



**João Filipe Silva  
Verdade**

**Comportamento à fadiga em modo I usando o  
ensaio Double Cantilever Beam modificado**





**João Filipe Silva  
Verdade**

**Comportamento à fadiga em modo I usando o ensaio  
Double Cantilever Beam modificado**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica dos Professores Doutores Alfredo Manuel Balacó de Moraes e António Manuel de Bastos Pereira, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **o júri**

**Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo,**  
Professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Luís Manuel Pires Martins de Abreu**  
Professor Adjunto, Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes**  
Professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Aveiro (Orientador)



## **agradecimentos**

Ao meu Orientador, Professor Doutor Alfredo Balacó de Moraes, por toda a ajuda e acompanhamento, tanto na componente teórica, como no desenvolvimento e organização da dissertação. A sua genialidade e sentido de humor foram uma constante que marcaram o meu curso.

Ao meu Co-orientador, Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, pela sua enorme dedicação e total disponibilidade para concretizar este projeto. A sua vontade genuína de ajudar e capacidade inata para ensinar marcaram o meu trajeto académico.

Aos meus Pais por todo o apoio, confiança e compreensão inestimáveis, pelos diversos sacrifícios suportados e constante encorajamento nesta minha etapa tão importante.

A todos os meus Amigos que me ajudaram e apoiaram ao longo destes anos. Pelos bons e inesquecíveis momentos que me proporcionaram nesta caminhada de um culminar de experiências e sentimentos.





**palavras-chave**

Máquina de Ensaios; Laminados Compósitos; Fadiga; Delaminagem; Modo I; DCB modificado; Lei de Paris; Taxa de Libertação de Energia de Deformação.

**resumo**

A delaminagem é um dos modos de rutura mais frequentes dos laminados compósitos, e que é geralmente tratado no âmbito da Mecânica da Fratura. Tem havido recentemente interesse crescente na caracterização do comportamento à delaminagem sob fadiga. O primeiro objetivo deste trabalho foi adaptar a máquina de baixo custo desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro à realização de ensaios de delaminagem sob fadiga em modo I. O segundo objetivo foi realizar alguns ensaios de laminado carbono/epóxico iniciando assim um estudo mais alargado de longo prazo. Para isso recorreu-se a ensaios Double Cantilever Beam (DCB) modificados sob deslocamentos cíclicos impostos. Os resultados obtidos foram analisados no quadro da bem conhecida Lei de Paris, que relaciona a taxa de propagação da fenda com a variação da taxa de libertação de energia de deformação. Apesar de serem ainda escassos para tirar conclusões seguras, os resultados indicam um comportamento à fadiga complexo, muito influenciado pelo fenómeno da ponte de fibras.



**keywords**

Testing Machine; Laminated Composites; Fatigue; Delamination; Mode I; DCB modified; Paris Law; Strain-Energy Release Rate.

**abstract**

Delamination is one of the most common damage modes of laminated composites. It is usually analyzed within the scope of Fracture Mechanics. Recently, there has been growing interest in the characterization of fatigue driven delamination. The main objective of the present work was to study the mode I delamination under fatigue of carbon/epoxy laminates through modified Double Cantilever Beam (DCB) tests under imposed cyclic displacements. The tests were conducted on a low cost machine developed at the Department of Mechanical Engineering of the University of Aveiro. The results proved to be consistent with well-known Paris law, which relates the crack propagation rate with the variation of the strain-energy release rate. Though scarce to draw definitive conclusions, the present results indicate a complex fatigue behavior, which is strongly influenced by fiber bridging.





# Índice

Capítulo 1 .....	1
Motivação e objetivos .....	1
Capítulo 2 .....	3
Introdução .....	3
2.1. Os materiais compósitos .....	3
2.2. Mecânica da fratura .....	6
2.3. Comportamento à fadiga em modo I .....	10
Capítulo 3 .....	15
A máquina de ensaios de fadiga .....	15
3.1. Componentes estruturais da MEF .....	15
3.2- Alterações estruturais efetuadas à MEF .....	18
3.3. Controlo do movimento .....	21
3.4 Célula de carga .....	25
3.5. Aquisição de dados da célula de carga .....	27
3.6. Calibração da célula de carga .....	29
3.7. Flexibilidade da MEF .....	33
Capítulo 4 .....	37
Procedimentos experimentais .....	37
4.1. Preparação dos provetes .....	37
4.2. Ensaio quase-estáticos .....	38
4.4. Ensaio de fadiga .....	41
4.4. Medição do comprimento de fenda .....	43
Capítulo 5 .....	47
Resultados e discussão .....	47
5.1-Ensaio quase estáticos .....	47
5.2 Ensaio de fadiga .....	49
Capítulo 6 .....	55
Conclusão trabalhos futuros .....	55
Referências .....	57
Anexos .....	61





# Capítulo 1

## Motivação e objetivos

Desde o período da pré-história o Homem tem tido a preocupação de fazer evoluir as suas ferramentas e de melhorar o seu bem-estar. Por isso, até aos tempos atuais, o Homem tem procurado utilizar e desenvolver novos materiais, sendo que as etapas deste processo têm servido para distinguir diferentes “Eras da Humanidade”.

Os compósitos surgem como resultado da referida evolução. Os primeiros materiais compósitos, tais como os conhecemos atualmente, aparecem na década de 1930, tendo tido grande expansão na década de 1960. Atualmente os materiais compósitos são aplicados em diversos setores de atividade, desde um simples artigo de uso doméstico até componentes das indústrias de ponta como a aeronáutica e aeroespacial. Durante a sua evolução houve uma grande preocupação em encontrar novas tecnologias de fabrico de forma a melhorar propriedades como a resistência mecânica a rigidez e a diminuir custos.

Apesar destes materiais apresentarem propriedades mecânicas excecionais, existem obstáculos ao nível da fratura interlaminar, também conhecida por delaminação, que é um dos modos de rutura mais graves. A caracterização da resistência à delaminação é feita no âmbito da mecânica da fratura.

Esta dissertação enquadra-se nas atividades de investigação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA), onde foi desenvolvida por antigos alunos uma máquina de ensaios de fadiga



(MEF). Os ensaios de fratura foram realizados em modo I, usando um dispositivo Double Cantilever Beam (DCB) modificado, desenvolvido na UA. As amostras caracterizadas foram obtidas de placas laminadas de carbono/epóxico, que foram sujeitas cargas cíclicas de modo a estudar a taxa de propagação da delaminação.

**O trabalho está estruturado da seguinte forma:**

**Capítulo 1-** Apresentação e objetivos gerais da dissertação.

**Capítulo 2-** Breve revisão de características essenciais dos materiais compósitos, de conceitos de mecânica da fratura e do comportamento à delaminação em fadiga sob modo I, seguido do enquadramento dos objetivos do trabalho.

**Capítulo 3-** Descrição dos componentes e do funcionamento da máquina de ensaios de fadiga concebida no DEM-UA, incluindo alterações efetuadas para a realização deste trabalho.

**Capítulo 4-** Descrição dos procedimentos experimentais utilizados.

**Capítulo 5-** Apresentação e discussão dos resultados obtidos.

**Capítulo 6-** Principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



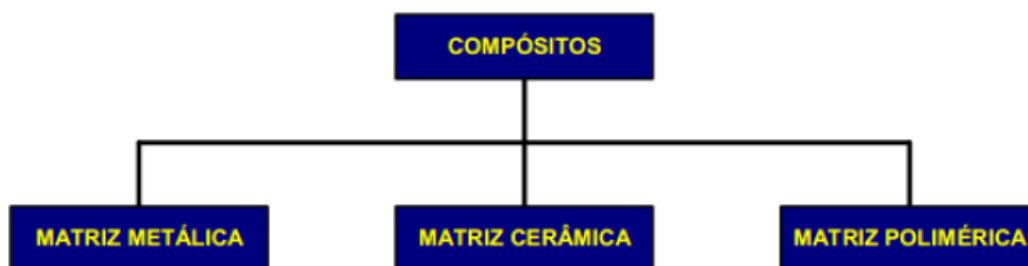
## Capítulo 2

### Introdução

#### 2.1. Os materiais compósitos

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais com propriedades físicas e químicas nitidamente distintas. Os componentes principais de um compósito são a matriz e o reforço, sendo que o comportamento de ambos é relevante para a resistência mecânica do compósito [Rezende e outros, 2011].

A matriz confere estrutura ao material compósito. Por isso, o tipo de matriz serve de base para classificar o tipo de material compósito (Figura 2.1). Por seu turno, o reforço tem por objetivo melhorar as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas. O compósito pode ter matriz metálica, cerâmica ou polimérica, sendo este último tipo de matriz o mais utilizado, devido ao baixo peso específico, fácil processamento e boas propriedades mecânicas.



**Figura 2.1**-Classificação de materiais compósitos [Callister e Rethwisch, 2009].



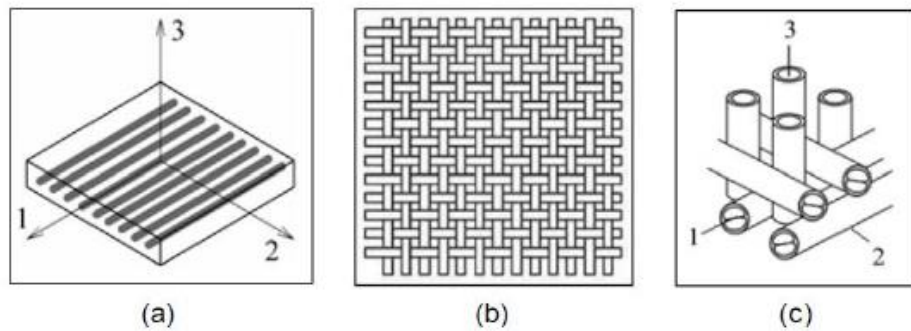
Existem dois tipos principais de matrizes de natureza polimérica: os termoplásticos e os termoendurecíveis.

Os termoplásticos apresentam elevada resistência ao impacto (tenacidade), facilidade no fabrico por injeção e podem ser reciclados. Uma das grandes desvantagens dos compósitos de matriz termoplástica surge na dificuldade de impregnar os reforços [Moura e outros, 2011]. O polipropileno e o poli-éter-éter-cetona (PEEK) são exemplos de matrizes termoplásticas.

Os termoendurecíveis tem a grande desvantagem de não poderem ser reciclados ou reprocessados. Porém, ao contrário dos termoplásticos, têm maior facilidade na impregnação dos reforços, devido à mistura dos seus componentes antes da “cura” apresentar menor viscosidade. As resinas de poliéster e de epóxido são termoendurecíveis muito usados como matrizes de compósitos.

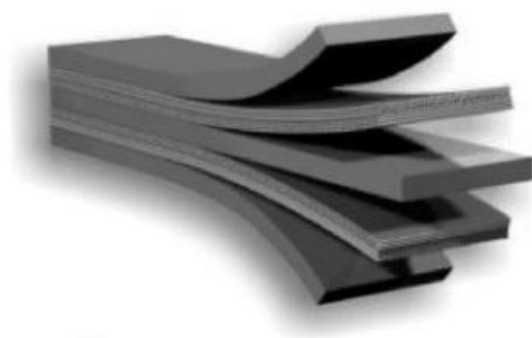
As propriedades mecânicas dos compósitos não dependem exclusivamente da matriz e do reforço, mas também do processo de fabrico e da orientação das fibras. Esta última característica permite classificar os compósitos da seguinte maneira (Figura 2.2):

- Unidirecionais: as fibras são alinhadas numa única direção;
- Bidirecionais: as fibras estão alinhadas em duas direções, normalmente perpendiculares;
- Tridimensionais; as fibras estão alinhadas segundo três direções, habitualmente também perpendiculares;
- Multidirecionais: as fibras estão dispostas segundo várias direções, geralmente através de uma estrutura laminada de camadas com diferentes orientações.



**Figura 2.2**-Representação esquemática da orientação das fibras contínuas: (a) fibras unidirecionais; (b) tecido bidirecional; (c) tecidos tridimensionais [Moura e outros, 2011; Pardini, 2000].

Graças às excelentes propriedades das fibras de vidro, carbono e de aramida, os compósitos de matriz polimérica têm excelentes propriedades mecânicas. Todavia, os laminados compósitos apresentam suscetibilidade ao aparecimento e propagação de fendas entre as suas camadas (Figura 2.3). Este fenómeno, conhecido por delaminação, constitui um dos modos de rutura que mais compromete o desempenho estrutural de laminados compósitos [Moura e outros, 2011].



**Figura 2.3** – Figura ilustrativa do fenómeno de delaminação [TU Delft, 2012].



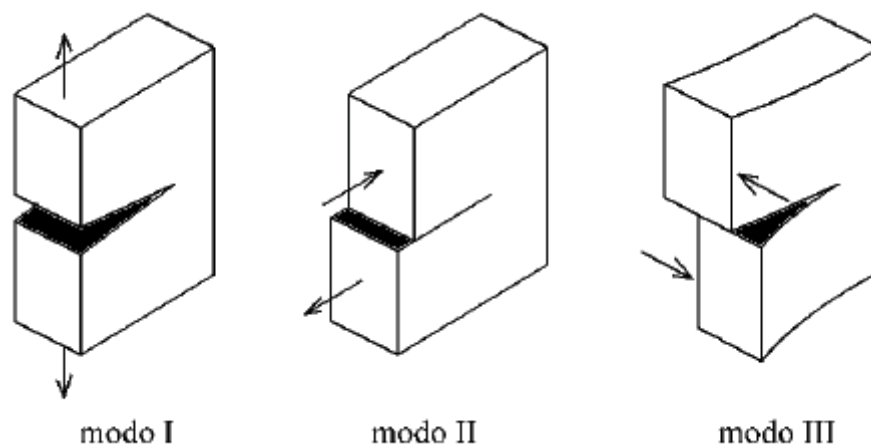
A delaminação pode ser gerada por defeitos induzidos durante o processo de fabrico ou durante o seu ciclo de vida, devido a tensões interlaminares. Apesar de já terem passado várias décadas desde o reconhecimento da importância deste modo de falha [O'Brien, 1982], ele continua a ser objeto de investigação e a condicionar o dimensionamento de estruturas compósitas [Paul e outros, 2002].

## 2.2. Mecânica da fratura

A mecânica da fratura estuda os processos mecânicos que levam à propagação de fendas, fissuras e outros "defeitos" que diminuem a resistência do material e podem conduzir à rutura. A mecânica da fratura permite avaliar a gravidade das fendas, prever a sua propagação e portanto, definir o período de vida útil da estrutura [Strohaecker, 1999]. Inicialmente era só aplicada a ligas metálicas de alta resistência, mas com evolução dos materiais houve necessidade de alargar o seu campo de aplicação.

Entre os principais impulsionadores da mecânica da fratura estão Inglis (1913) e Griffith (1920), que desenvolveram a chamada mecânica da fratura linear elástica baseada no fator de intensidade de tensão ( $K$ ) e na taxa de libertação de energia de deformação ( $G$ ). Sob carregamentos monotónicos, as fendas propagam-se quando  $K$  ou  $G$  atingem os valores críticos  $K_c$  ou  $G_c$ , conhecidos por tenacidade e a taxa de crítica de libertação de energia de deformação, respetivamente. Estas quantidades são medidas em ensaios normalizados.

Um dos aspetos que mais condiciona a resistência de estruturas com fendas é o modo de solicitação. A mecânica da fratura considera 3 modos elementares (figura 2.4), que podem surgir combinados.

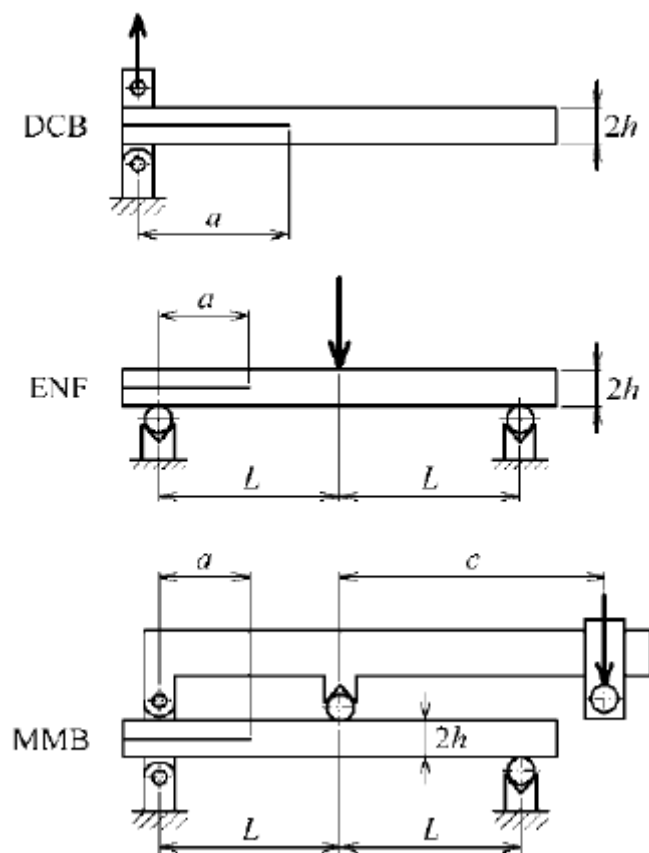


**Figura 2.4-** modos de propagação de fenda [Pereira e Morais, 2008].

No modo I existe uma propagação de fenda por tensões locais de tração, resultando no afastamento das superfícies (*opening mode*). No modo II (*sliding mode*) as superfícies deslizam uma em relação à outra num movimento relativo perpendicular à frente de fenda. Por fim, sob modo III (*tearing mode*) há também um deslizamento das superfícies, mas o movimento é paralelo à frente de fenda. Nestes dois últimos modos as fendas propagam-se devido a tensões de corte locais.

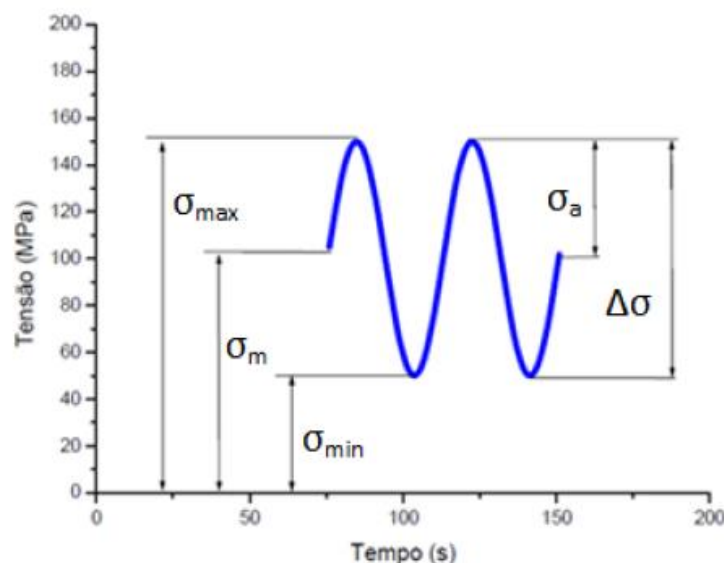
No que diz respeito à delaminação em laminados compósitos, os modos de solicitação mais relevantes são o modo I, o modo II e o modo-misto I-II [Moura e outros, 2011]. Há atualmente vários ensaios normalizados para medir as taxas críticas de libertação de energia (Figura 2.5):

- o ensaio de modo I *Double Cantilever Beam* (DCB) [ISO 15204, 2001; ASTM D5528, 2001];
- o ensaio de modo II *End-Notched Flexure* (ENF) [ASTM D7905-14, 2014];
- o ensaio de modo-misto I e II designado por *Mixed-Mode Bending* (MMB) [ASTM D6671, 2006].



**Figura 2.5** –ilustração dos ensaios DCB, ENF e MMB [Pereira e Morais, 2008].

Por seu turno, o estudo da rutura por fadiga de materiais exige que se imponha um carregamento cíclico à amostra, de modo a gerar tensões variáveis no tempo. Num carregamento cíclico sinusoidal típico (Figura 2.6) pode-se identificar como parâmetros importantes a tensão máxima  $\sigma_{\max}$ , a tensão mínima  $\sigma_{\min}$ , a tensão média  $\sigma_m$ , a amplitude de tensão  $\sigma_a$ , a amplitude de variação de tensão ( $\Delta\sigma$ ) e o rácio de tensões de tensões  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ . Quando existe já uma fenda e se pretende estudar a sua taxa de propagação, usa-se  $K$  ou  $G$  em vez da tensão  $\sigma$ .

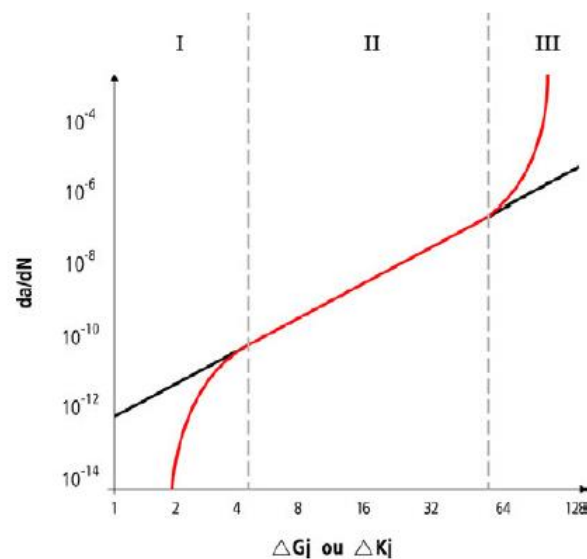


**Figura 2.6**-Simbologia utilizada para definir os parâmetros caraterísticas dos carregamentos cíclicos [Martins, 2014].

Os estudos da propagação de fendas em fadiga mostram três regimes distintos quando os resultados são representados em gráficos da taxa de propagação em função de  $\Delta K$  ou de  $\Delta G$  (Figura 2.7) [Dowling, 2006]. O regime I, designado por zona “sub-crítica”, é caracterizado por uma propagação incipiente, ou mesmo inexistente. No regime II, designado por zona “estável”, a curva de propagação da fenda é aproximadamente linear quando se usa escala logarítmica em ambos os eixos. Aplica-se então uma relação que é habitualmente designada por Lei de Paris [Paris e Erdogan, 1963].

$$\frac{\partial a}{\partial N} = D \Delta G^n \quad (2.1)$$

sendo  $a$  o comprimento de fenda,  $N$  o número de ciclos de carregamento e  $D$  e  $n$  parâmetros a determinar a partir do ajuste de resultados experimentais. Por ultimo, no regime III dá se uma propagação rápida e instável da fenda.



**Figura 2.6-** Comportamento típico da propagação de fendas de fadiga [Dowling, 2006]

Como os ensaios de fadiga são frequentemente realizados com rácios de tensão baixos, tipicamente  $R = 0.1$ , e a lei de Paris é expressa em função de  $G_{\max}$  em vez de  $\Delta G$ . [Pascoe e outros, 2013].

### 2.3. Comportamento à fadiga em modo I

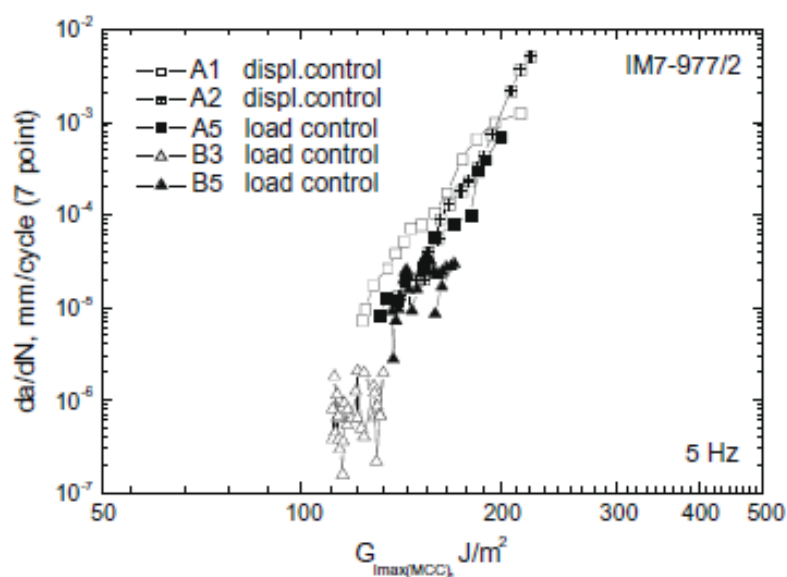
Ao longo dos anos têm sido apresentados vários trabalhos acerca da delaminação sob fadiga em modo I. Entre os principais objetivos dos estudos realizados encontram-se sobretudo [Pascoe e outros, 2013]:

- A medição do limiar de propagação (threshold);
- A determinação dos parâmetros da Lei de Paris;
- A avaliação de critérios de propagação tendo em conta vários parâmetros, como o rácio de tensões  $R$ , o modo de solicitação, etc.



Brunner e Outros (2009) efetuaram ensaios em dois laminados de fibra de carbono seguindo as linhas base da norma ISO 15024. Os referidos autores recomendaram que se adotasse nos ensaios:

- Controlo de deslocamento em vez de controlo de carga (Figura 2.7);
- Rácio de tensões  $R = 0.1$ ;
- Frequência o mais elevada possível (10 Hz)
- Aquisição de dados para cálculo das taxas de propagação tendo por base medições do comprimento de fenda em intervalos de 5.000 a 10.000 ciclos, através da observação visual no microscópio.

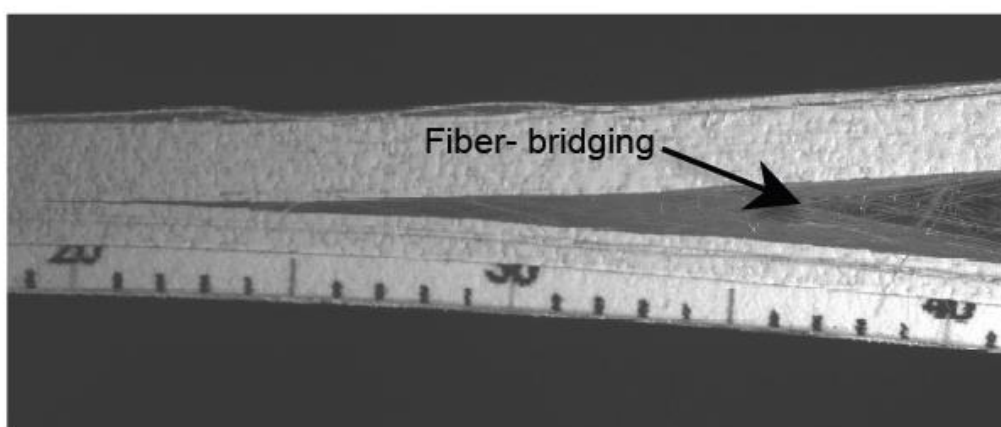


**Figura 2.7** – Resumo de resultados obtidos por Brunner e outros (2009).

Devido à grande dispersão nos resultados, tanto intra-laboratorial como inter-laboratorial, Stelzer e outros (2012) concluíram que pode ser difícil

classificar diferentes laminados com base apenas nos dados brutos para implementar na lei de Paris.

Murri (2011) realizou ensaios quase-estáticos e ensaios de fadiga em vários compósitos, tendo concluído que a ponte de fibras deve ser contabilizada na avaliação do comportamento à delaminação sob fadiga, principalmente em materiais com grande extensão de ponte de fibras (figura 2.8).



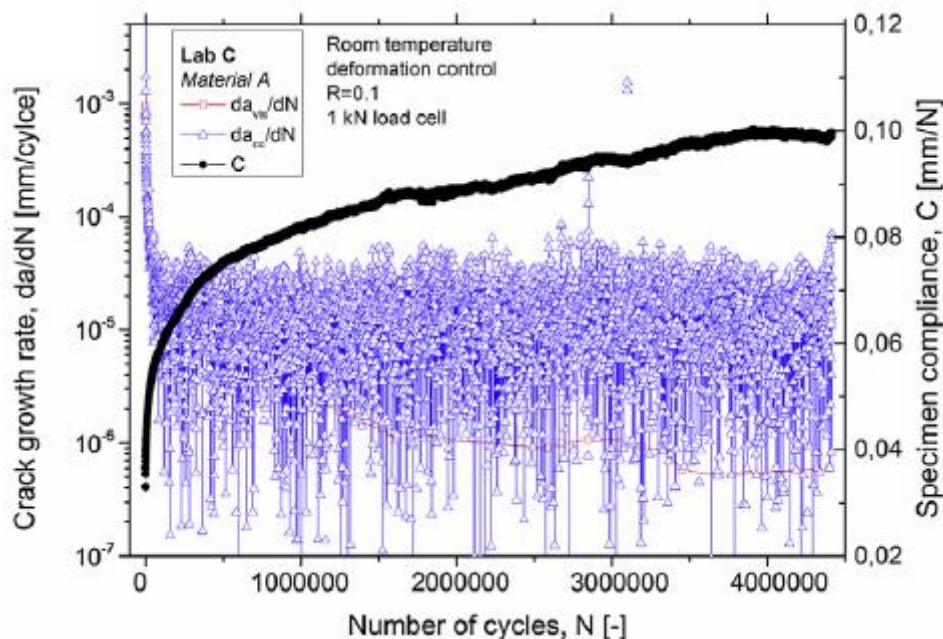
**Figura 2.8** - Ponte de fibra num ensaio DCB [Murri, 2011].

Por outro lado, segundo Yao e outros (2014), a ponte de fibras que se gera na propagação de fenda em fadiga é diferente da ponte de fibra criada no ensaio quase-estático. Por isso, Yao e outros (2014) consideram incorreto usar a curva de resistência (curva  $R$ ) dos ensaios quase-estáticos para normalizar os resultados de fadiga.

Rans e outros (2011) mostraram que, para respeitar o princípio da sobreposição, a caracterização do comportamento à fadiga usando a amplitude de variação taxa de libertação de energia de deformação exige que esta seja definida por

$$\Delta G = \left( \sqrt{(G_{max})} - \sqrt{(G_{min})} \right)^2 \quad (2.2)$$

Stelzer e outros (2014) estudaram a delaminação sob fadiga de 3 compósitos de fibra de carbono. Os ensaios foram realizados em 5 laboratórios e usaram-se três tipos de análise de dados: teoria das vigas simples (SBT), teoria das vigas corrigida (CBT) e calibração da flexibilidade modificada (MCC). Com base nos dados recolhidos, Stelzer e outros (2014) concluíram que os métodos CBT e MCC deram origem a resultados mais conservadores, mas com mais dispersão. Stelzer e outros (2014) identificaram o ruído como sendo um dos problemas principais nos ensaios DCB de fadiga (Figura 2.9).

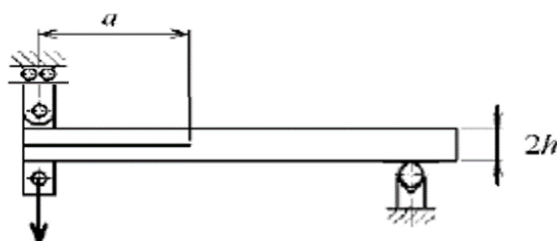


**Figura 2.9-** Elevado grau de ruído em ensaios DCB de fadiga [Stelzer e outros, 2014].

Os materiais utilizados nos estudos de Brunner e outros (2016) foram todos laminados de fibra de carbono obtidos de diferentes fornecedores. Independente da abordagem utilizada para a análise, verificou-se que os valores

de  $G_I$  de limiar de propagação (*thresholds*) eram claramente inferiores aos de  $G_{Ic}$ . Isso pode ter fortes implicações para o projeto estrutural de compósitos com base no limiar de propagação [Brunner e outros, 2016).

No início deste trabalho considerou-se que um dos fatores que mais contribuem para o ruído no ensaio DCB é o balancear da zona livre do provete (Figura 2.5), até porque há sempre folgas entre os furos dos blocos e as cavilhas. Daí ter-se optado por modificar o ensaio DCB incluindo um apoio adicional (Figura 2.10) e fazendo com que a carga fosse aplicada no bloco inferior. A influência do apoio adicional é praticamente nula, face ao comprimento dos provetes e à natureza do carregamento. De facto, o provete é muito leve e gera cargas iniciais muito pequenas nos suportes. Além disso, a menos de uma ligeira rotação do provete, a carga aplicada no bloco inferior será quase integralmente absorvida pelo bloco superior. Evidentemente, importava avaliar os resultados com este novo dispositivo.



**Figura 2.10-** Representação\_esquemática Ensaio DCB modificado.

## Capítulo 3

### A máquina de ensaios de fadiga

#### 3.1. Componentes estruturais da MEF

Uma vez que as máquinas servo-hidráulicas habitualmente utilizadas para realizar ensaios de fadiga têm custos de aquisição bastante elevados, recorreu-se a uma máquina projetada e desenvolvida por antigos alunos que frequentaram o Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica (MIEM) no DEM-UA. A máquina (Figura 3.1), aqui designada por MEF, é bastante simples, mas tem as características necessárias para a realização desta dissertação.



**Figura 3.1-** Máquina de ensaio de fadiga

A nível da estrutura mecânica, a MEF é constituída por três partes distintas: uma mesa superior, uma mesa inferior e uma plataforma móvel. As duas mesas estão ligadas entre si por quatro varões que garantem a rigidez e permitem guiar a plataforma móvel nos seus movimentos ascendentes e descendentes.

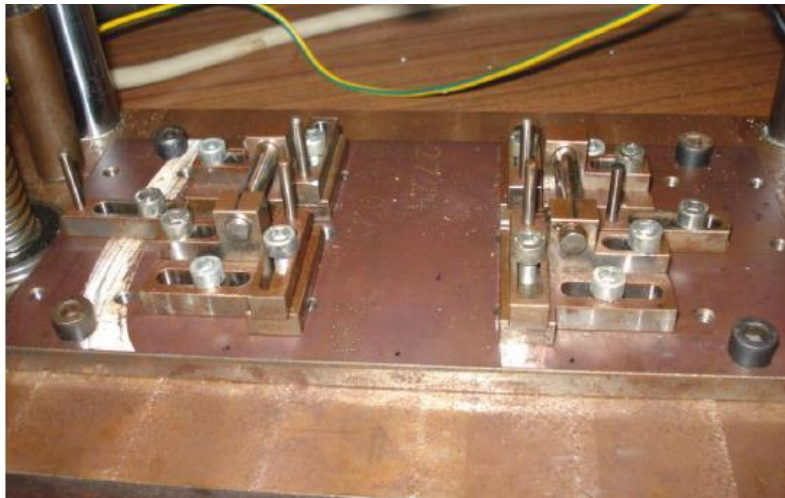
Na mesa superior (Figura 3.2) está instalado um motor elétrico passo-a-passo monofásico com relação de transmissão 1:1. O motor transmite movimento à plataforma através de dois fusos. Para garantir translação vertical sincronizada, usa-se uma correia dentada ligada aos dois fusos.



**Figura 3.2-** Mesa superior da MEF

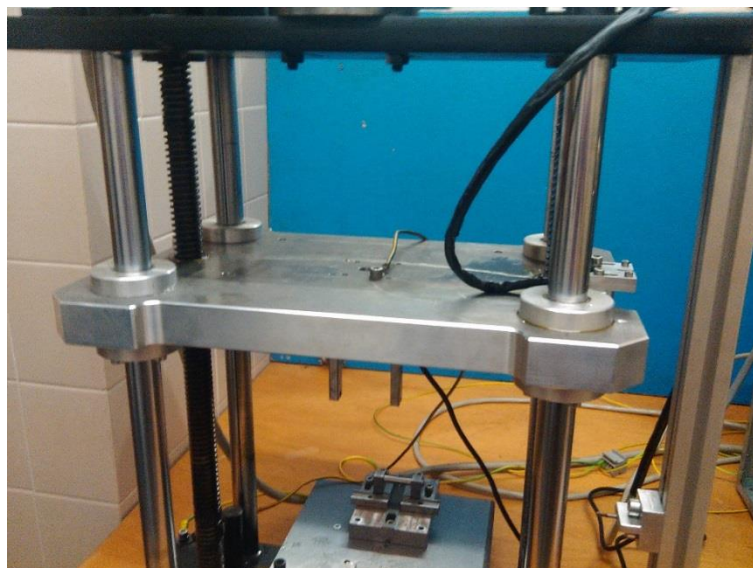
A mesa inferior (Figura 3.3) destina-se sobretudo ao apoio do provete. Esta mesa está preparada para uma grande variedade de dispositivos de fixação, oferecendo a possibilidade de realizar outros tipos de ensaio de fratura. Concretamente, no início desta dissertação a mesa encontrava-se preparada para fazer ensaios de fadiga em modo II do tipo End-Notched Flexure (ENF).





**Figura 3.3-** Mesa inferior da MEF preparada para ensaios ENF.

A plataforma móvel efetua movimentos ascendentes e descendentes, tendo um curso de 600mm. Esta parte da MEF tem acoplada a célula de carga juntamente com a cabeça de carregamento do provete (Figura 3.4) e o sensor ótico.



**Figura 3.4-** Plataforma móvel da MEF.

### 3.2- Alterações estruturais efetuadas à MEF

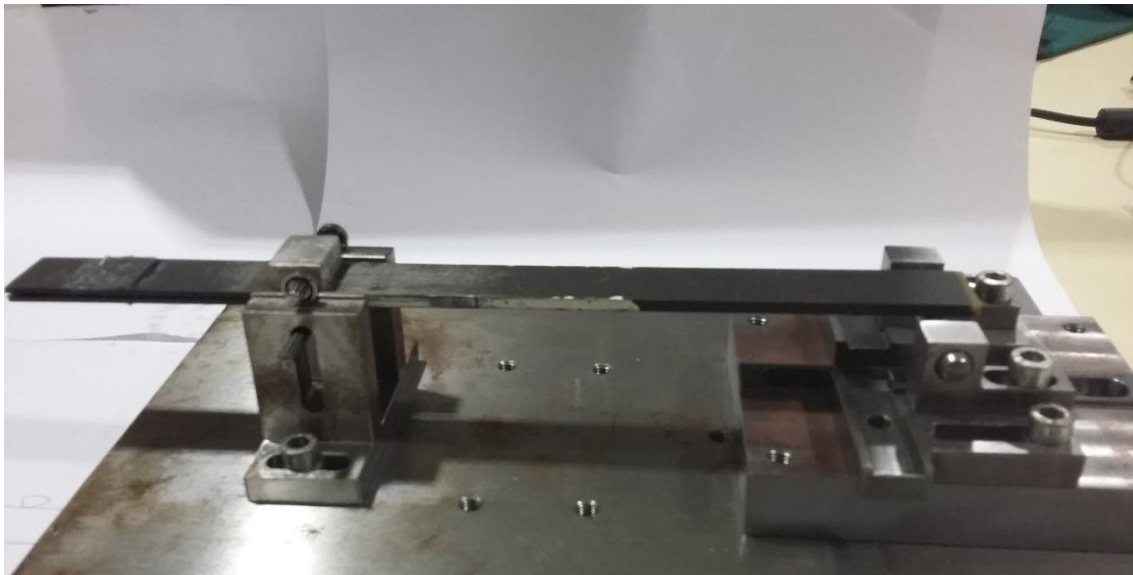
De modo a poder realizar ensaios DCB modificados foi necessário fazer modificações a nível estrutural da máquina. Uma das alterações incidiu no dispositivo de carregamento do provete (Figura 3.5). Este componente, com perfil em “U”, está ligado por um parafuso M10 à célula de carga que se encontra na parte inferior da plataforma móvel. Este perfil aloja uma cavilha de 4mm em furos passantes. É precisamente a cavilha que carrega o provete, impondo um deslocamento vertical descendente ao bloco inferior que lhe está colado (Figura 2.8). O sistema permite um deslocamento vertical máximo de 30mm.



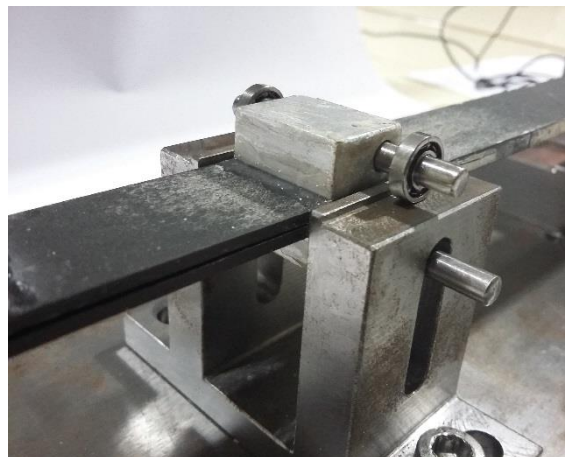
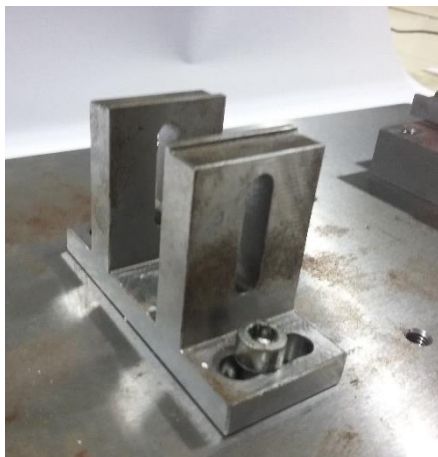
**Figura 3.5-** Dispositivo que transmite carga ao provete



A segunda modificação foi na mesa inferior da MEF, e exigiu maquinar os apoios para o provete. Os dois apoios estão aparafusados a uma chapa de aço que serve como base (Figuras 3.6 e 3.7)



**Figura 3.6-** Apoios do provete que se encontram na mesa inferior da MEF



**Figura 3.7-** Apoio frontal sem e com provete.

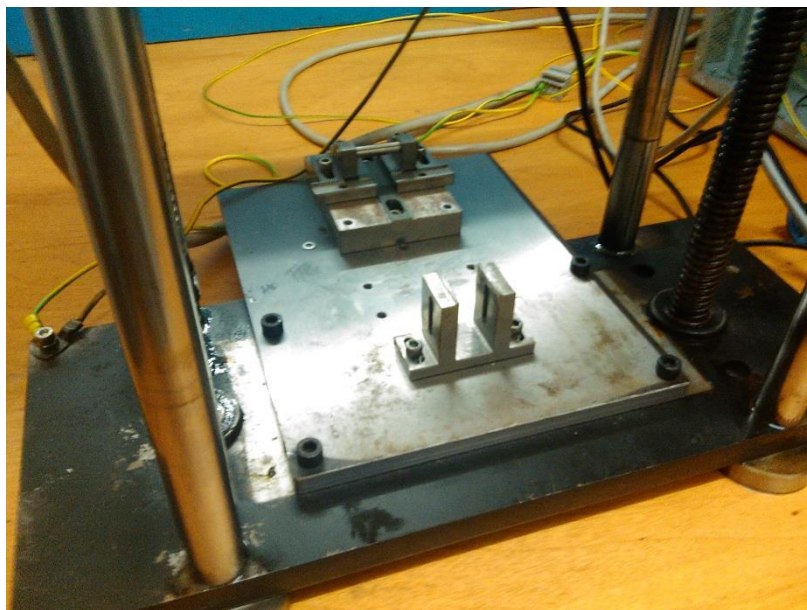
O apoio dito frontal, alberga a cavilha de 4mm de diâmetro que se aloja no bloco superior do provete, e dois rolamentos fornecidos pela empresa SKF, como se pode ver na Figura 3.7, permitindo dois graus de liberdade ao provete. A Figura 3.7 mostra também a cavilha de carregamento do bloco inferior, que é alojada no perfil “U” da Figura 3.5.

O apoio posterior (Figura 3.8) destina-se a suportar a zona sem delaminagem do provete, e constitui o aspeto caraterístico do provete DCB modificado. A posição deste apoio pode ser alterada, dando assim flexibilidade ao dispositivo para acomodar provetes de diferentes geometrias.



**Figura 3.8-** Apoio posterior.

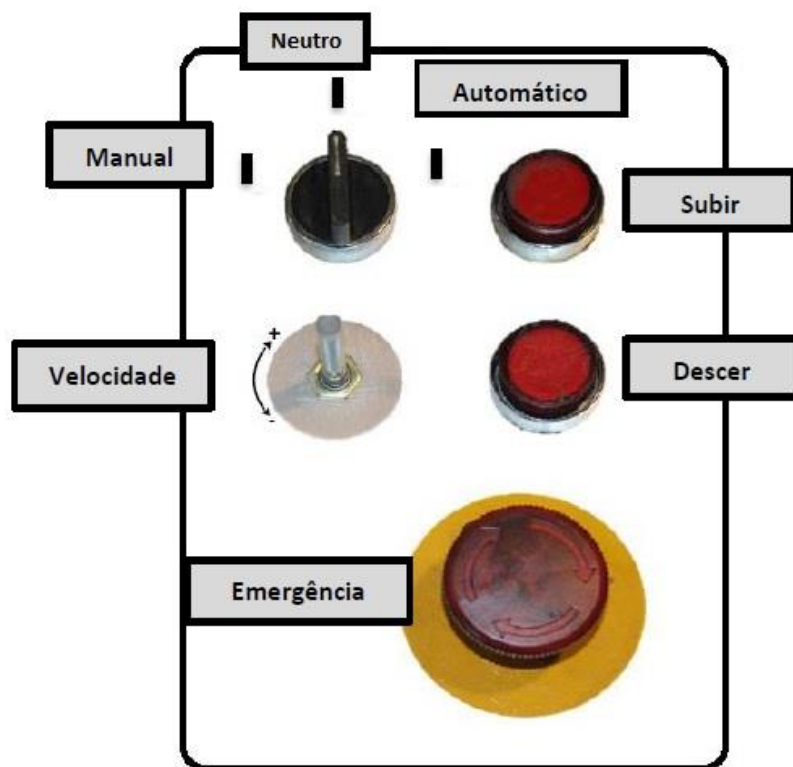
A base em chapa de aço, juntamente com os apoios, está aparafusada à mesa inferior da MEF (Figura 3.9).



**Figura 3.9-**Mesa inferior da MEF.

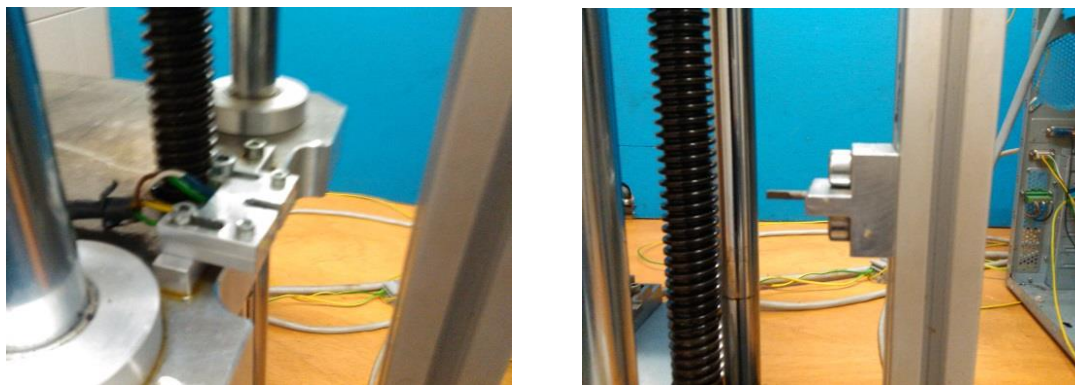
### 3.3. Controlo do movimento

O controlo do movimento do motor é efetuado por uma placa de Arduino e respetivo *software*, disponibilizado gratuitamente no *site* oficial. O Arduino é uma plataforma de computação *open-source* com entradas e saídas analógicas e digitais, que permite enviar e receber dados através de porta USB. Para desempenhar a sua função, normalmente em modo automático, é necessário um programa escrito em linguagem C. Neste caso os parâmetros mais importantes são a frequência do movimento da plataforma, o número de ciclos e os deslocamentos máximo e mínimo. Este programa também permite atuar num modo manual, funcionalidade que é essencial para fazer o ajuste de posição da plataforma. A seleção do modo de operação desejado é feita no painel de controlo (figura 3.10) que se encontra numa caixa de suporte.



**Figura 3.10**-Painel de controlo situado na parte superior da caixa de suporte do quadro elétrico.

A MEF incorpora um sensor ótico, constituído por duas partes (Figura 3.11): uma parte móvel aparafusada numa das extremidades da plataforma, e uma referência fixa, que é um pino de alumínio aparafusado a um perfil que une as mesas superior e inferior. A posição do pino pode ser ajustada.



**Figura 3.11-** Partes móvel (à esquerda) e fixa (à direita) do sensor ótico.

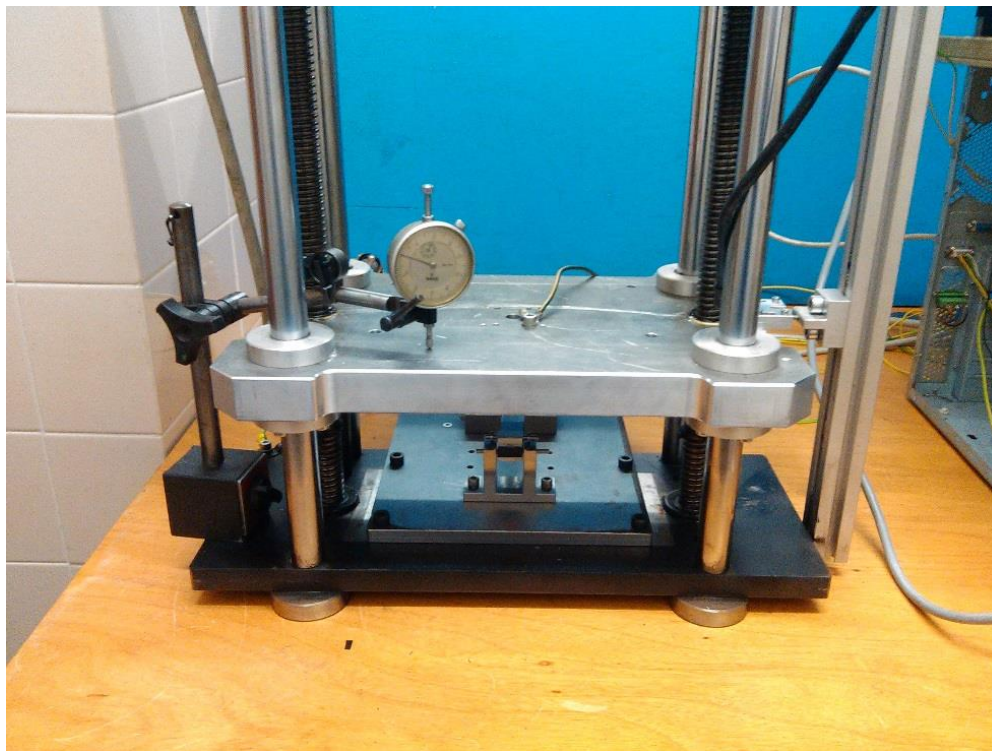
Como o motor que movimenta a plataforma é assíncrono, e, portanto, com circuito em malha aberta, pode perder passos ao longo do ensaio. Com ajuda do sensor ótico, o sistema consegue verificar a cada ciclo se existe perda de passos, e fazer as correções apropriadas. Isto é possível porque o sensor ótico consegue referenciar a posição real a cada ciclo através da interrupção cíclica do feixe de luz causada pelo pino.

Todavia, durante alguns ensaios experimentais foi detetado funcionamento incorreto deste sistema, pois no fim de cada ensaio a plataforma não terminava na posição inicial. Esta conclusão baseou-se:

- Em medidas feitas com um comparador da marca King com resolução mínima de 0.01mm, que foi instalado num suporte de base magnetizada, como mostra a Figura 3.12;

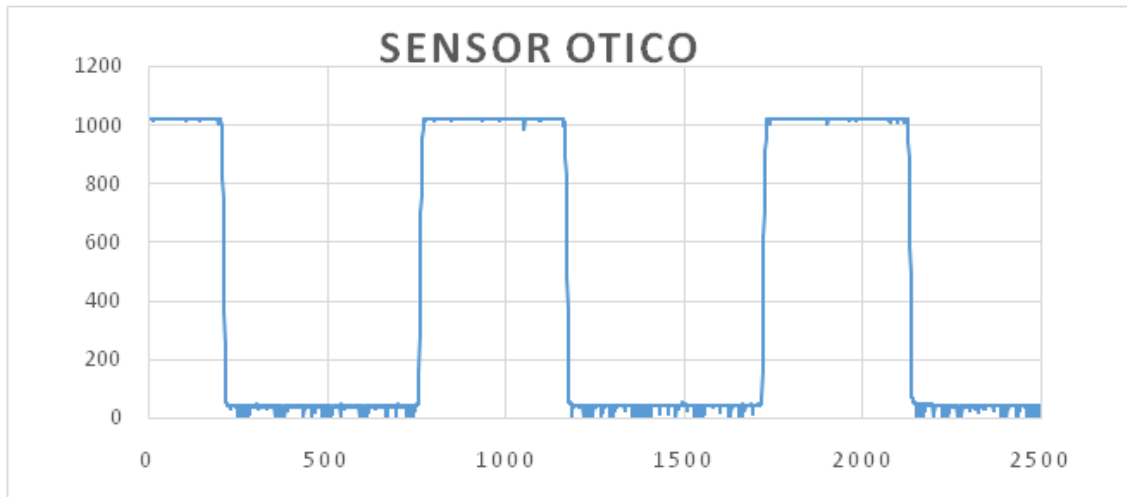
- Na utilização do software *Processing* 3.0, descarregado gratuitamente do *site* oficial, que regista a ordem de correção de passos dada pelo Arduino a cada ciclo realizado.





**Figura 3.12-** Comparador fixo numa base magnetizada.

A análise do sistema revelou que o funcionamento incorreto era causado pelas ligações do sensor ótico estarem deterioradas. Procedeu-se à troca do sensor e à soldagem do cabo, e verificou-se que o novo sensor estava a funcionar corretamente. Para isso efetuaram-se testes em vazio para validar a interrupção do feixe de luz, confirmando os dados do ficheiro gerado pelo software Processing, exemplificado na Figura 3.13. Caso não seja possível obter uma leitura semelhante, é necessário ajustar o pino ou verificar o sensor. Este procedimento de verificação deve ser feito sempre que exista uma alteração do deslocamento imposto no ensaio.



**Figura 3.13-** Gráfico que demonstra que existe interrupção do feixe de luz

### 3.4 Célula de carga

Inicialmente a MEF tinha incorporada uma célula de carga do tipo “disco” na parte inferior da plataforma móvel, ligada por 4 parafusos (Figura 3.14). Esta célula tinha uma capacidade de 500N.



**Figura 3.14-**Célula de carga localizada na parte inferior da plataforma.

Após cálculos e ensaios preliminares, concluiu-se que deveria ser usada uma célula com menor capacidade de carga para maior rigor das medições. Optou-se por isso por uma célula de carga do tipo “disco” com as mesmas dimensões, mas com capacidade de carga de 100N. A célula é de marca “branca”, modelo 6610, referência 1013101, com sensibilidade de 2mV/V. De referir que esta célula de marca “branca” é muito mais barata do que as células com marca, mas não apresentava qualquer tipo de ligação para além de um cabo com 5 fios descarnados. Logo, recorreu-se a um adaptador RJ50 (Figura 3.15) para conseguir ligar a célula a um amplificador de sinal.



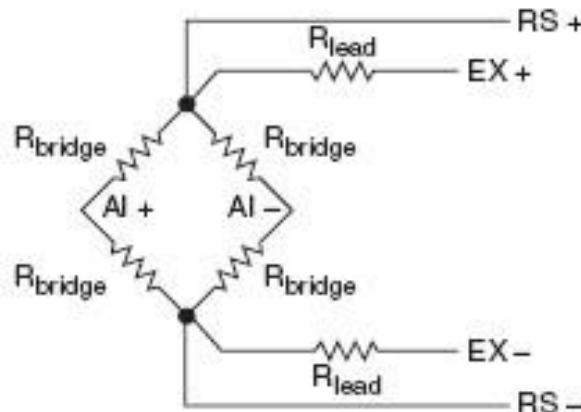
**Figura 3.15-** Adaptador RJ50.

Para verificar que a célula se encontrava em bom estado, e sabendo que a parte eletrónica da célula era constituída por uma Ponte de Wheatstone, utilizou-se um multímetro para medir as resistências e suas flutuações. A flutuação máxima de 2 Ohm foi bastante baixa, mas foi tida em conta na carta do *LabVIEW* (software de aquisição de dados) para calibrar a célula.

É de salientar que as células de carga de alta qualidade apresentam 7 fios, em vez dos 5 da que foi utilizada. Concretamente, a célula usada não tem



as ligações RS+ e RS- da ponte de Wheatstone (Figura 3.16) que permitem fazer a compensação da variação de temperatura dos circuitos nas medições.



**Figura 3.16** – Esquema da Ponte de Wheatstone completa.

Apesar desta lacuna, constatou-se que o efeito do aquecimento resultante do funcionamento continuado (12 horas seguidas ou mais) nas cargas medidas era muito pequeno (da ordem dos 0.2 N), e, portanto, foi desprezado.

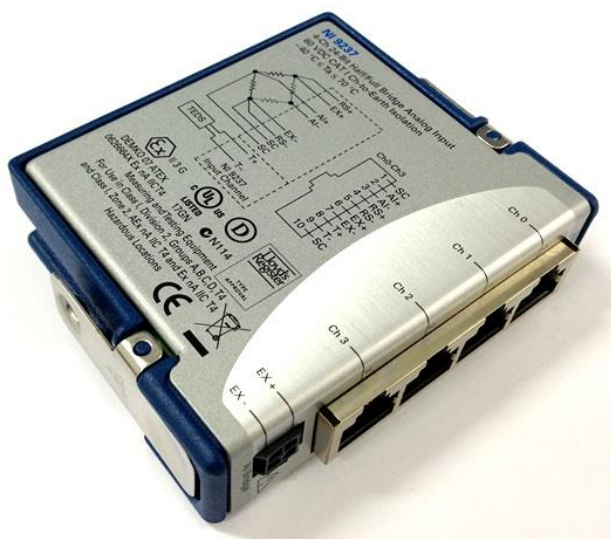
### 3.5. Aquisição de dados da célula de carga

Para obter os valores da carga aplicados na célula durante os ensaios recorreu-se ao *software* de aquisição de dados *LabVIEW*, versão 2013, que integra a plataforma de projeto da *National Instruments* (NI). O sinal da célula de carga foi amplificado pelo *hardware* de aquisição de dados designado por NI CompactDAQ-9178 (Figura 3.17). Trata-se de um dispositivo pequeno e portátil que comunica através da porta USB com capacidade para 8 canais, e que permite fazer medições de sinais físicos e elétricos.



**Figura 3.17-**Placa NI CompactDAQ-9178.

Para completar o sistema de aquisição de dados, usou-se um módulo de ponte NI 9237 (Figura 3.18). Todo o *software* necessário foi gratuitamente descarregado do *site* da *National Instruments*, tornando assim possível instalar os *drives* que asseguram o funcionamento correto do aparelho.



**Figura 3.18-** módulo de ponte NI 9237.

### 3.6. Calibração da célula de carga

Depois de ter o programa *LabVIEW* a receber valores das cargas aplicados na célula de carga, foi necessário realizar uma calibração. Para isso recorreu-se à uma máquina universal de ensaios Shimadzu AG 50 KN-G (Figura 3.19), na qual foi instalada uma célula de carga Shimadzu SLBN-500N (Figura 3.20), com 500N de capacidade. Esta célula é da classe 0.5 à compressão, ou seja, garante um desvio inferior a 5% do valor medido.



**Figura 3.19-** Máquina universal de ensaios Shimadzu AG 50 KN-G.



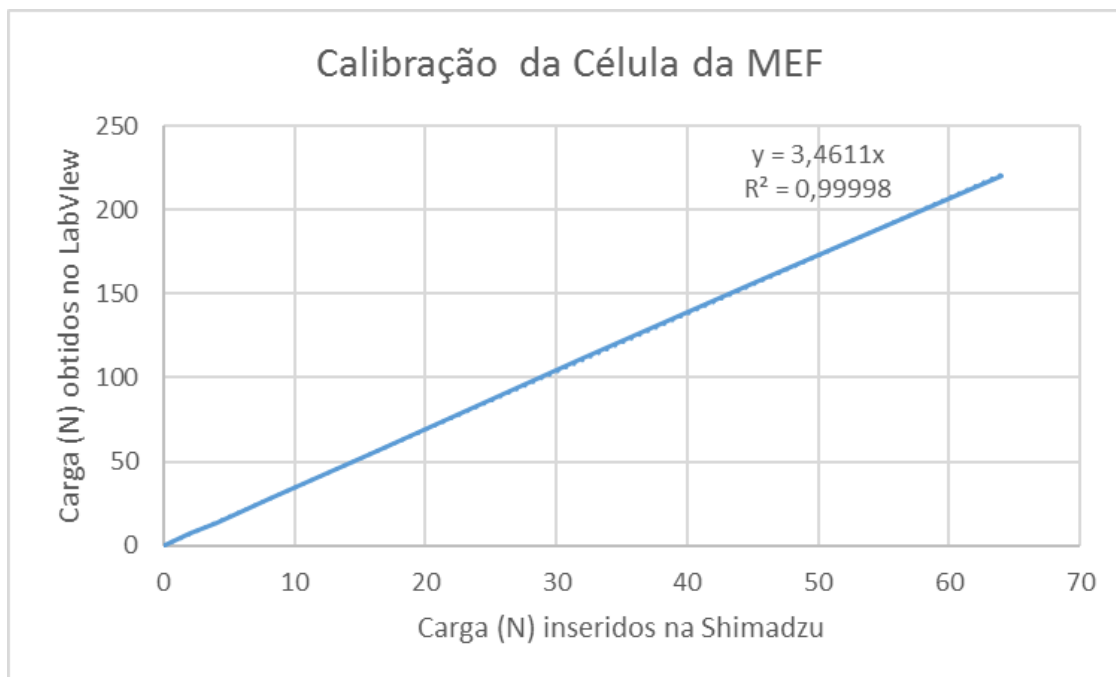
**Figura 3.20-** Célula de carga de 500N da marca Shimadzu.

Depois de fixar a célula de carga da MEF na máquina Shimadzu, como se mostra na Figura 3.21, aplicou-se carga de compressão no conjunto, tendo sempre o cuidado de não ultrapassar os 100N de capacidade da célula de carga da MEF.



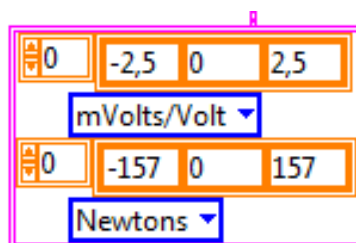
**Figura 3.21-** Processo usado para realizar a calibração da célula de carga da MEF.

Efetuaram-se 8 medições diferentes e foram registados os valores aplicados na máquina Shimadzu e os valores obtidos pelo *LabVIEW*. Com estes valores foi possível obter a curva de calibração da célula da MEF (Figura 3.22), que se confirmou ser praticamente uma reta.



**Figura 3.22-** Gráfico de calibração da célula de carga da MEF e respetiva linha de tendência.

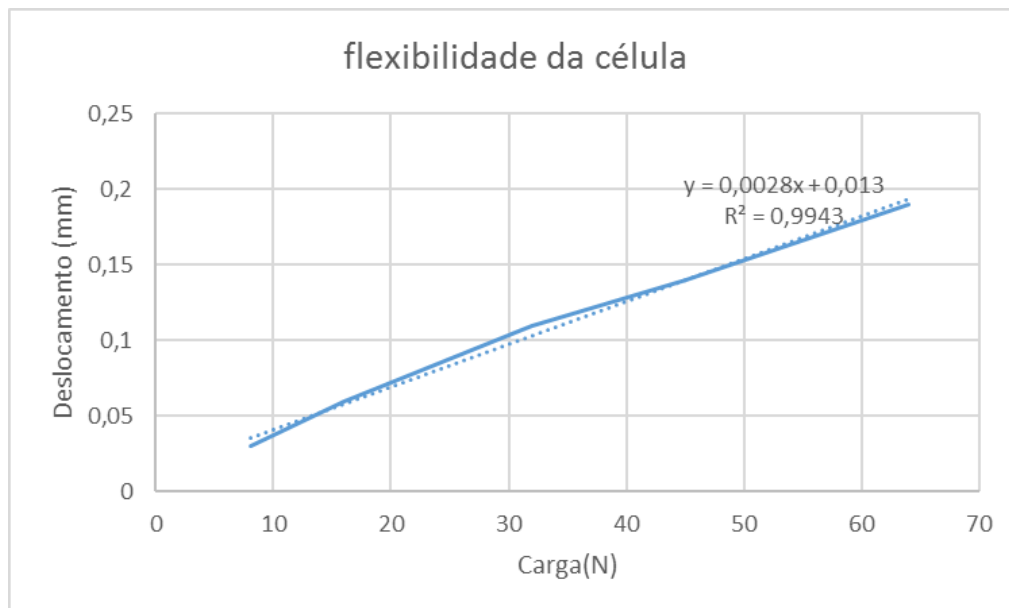
Todavia, como se pode observar na Figura 3.22, a célula não se encontrava calibrada inicialmente, pelo que foi necessário alterar o ganho apresentado no diagrama de blocos da carta de aquisição de dados (Figura 3.23), tendo em conta o declive do gráfico.



**Figura 3.23–** Tabela do diagrama de blocos relativa ao ganho da célula.



Para verificar que a célula estava efetivamente calibrada, repetiu-se o mesmo procedimento, tendo agora o declive sido de 1,00062. Este ensaio permitiu também obter a flexibilidade da célula recorrendo aos deslocamentos medidos pela máquina Shimadzu. O tratamento de dados (Figura 3.24) mostrou que a flexibilidade da célula era 0.0028N/mm.



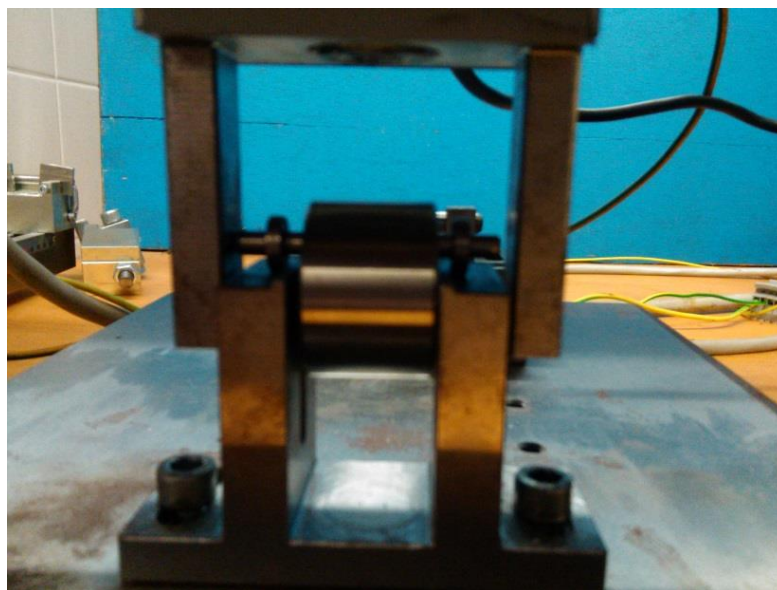
**Figura 3.24-** Gráfico da flexibilidade da célula

### 3.7. Flexibilidade da MEF

Para garantir uma melhor precisão dos resultados obtidos, há que medir a flexibilidade de todo o sistema de carregamento, ou seja da MEF com a célula de carga e dispositivos montados. A primeira opção considerada foi utilizar um vídeo extensómetro. Porém, esta opção foi abandonada devido à dificuldade em medir o deslocamento da cavilha de carregamento. A solução encontrada passou por maquinar uma peça rígida a usar no lugar do provete (Figuras 3.25 e 3.26).



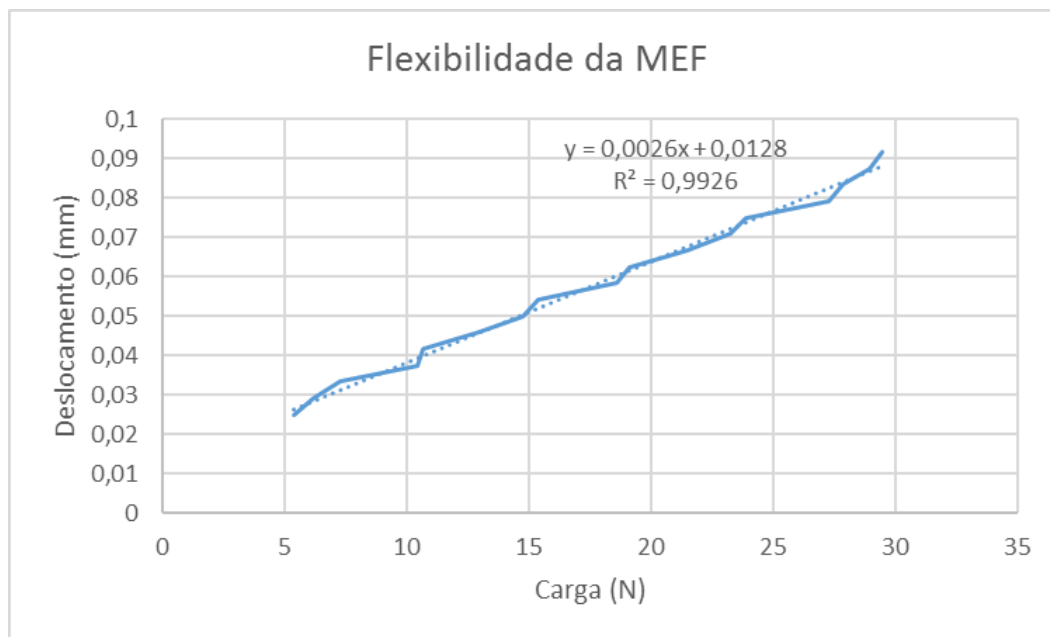
**Figura 3.25-** Peça maquinada usada para medir a flexibilidade da MEF.



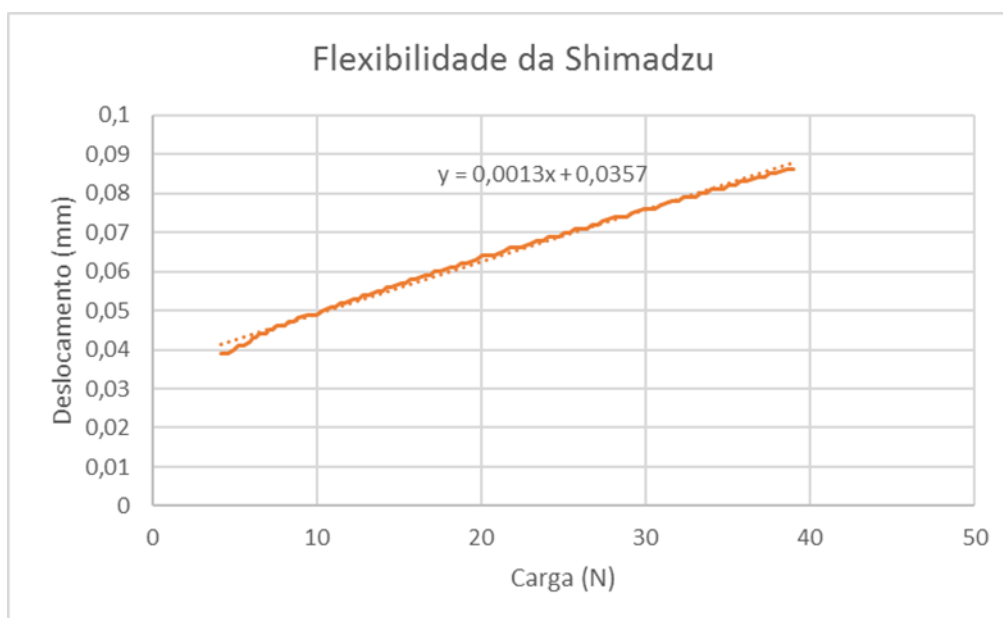
**Figura 3.26-** Montagem usada para obter a flexibilidade da MEF.

Elaborou-se um programa de comando em que o deslocamento era aplicado por impulsos, pois este seria à partida muito pequeno e era fundamental evitar sobrecarregar a célula de carga. Os ensaios mostraram que a flexibilidade da MEF era aproximadamente igual à da célula de carga (Figura 3.27).



**Figura 3.27-** Gráfico da flexibilidade da MEF

De referir ainda que, tendo a máquina Shimadzu sido usada para realizar ensaios quase-estáticos, mediu-se também sua a flexibilidade seguindo um procedimento análogo ao acima descrito (Figura 3.29),. A flexibilidade medida da Shimadzu foi 0.0013N/mm (Figura 3.28), valor bastante inferior ao da MEF, conforme esperado.

**Figura 3.28-** Gráfico da flexibilidade da Shimadzu



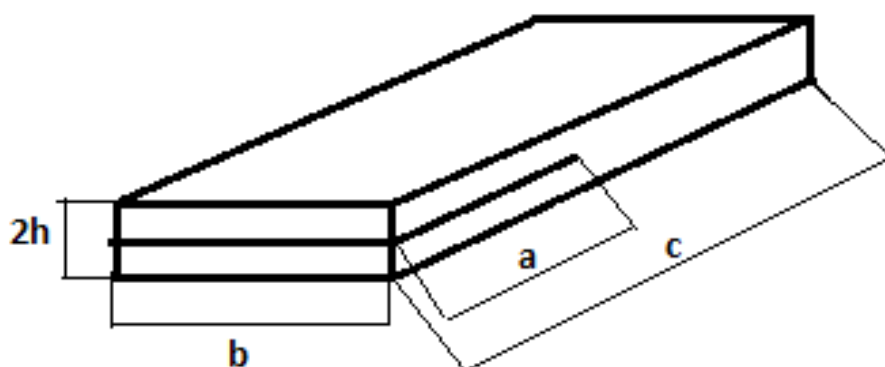
**Figura 3.29\_** Montagem para medição da flexibilidade da máquina Shimadzu.

## Capítulo 4

### Procedimentos experimentais

#### 4.1. Preparação dos provetes

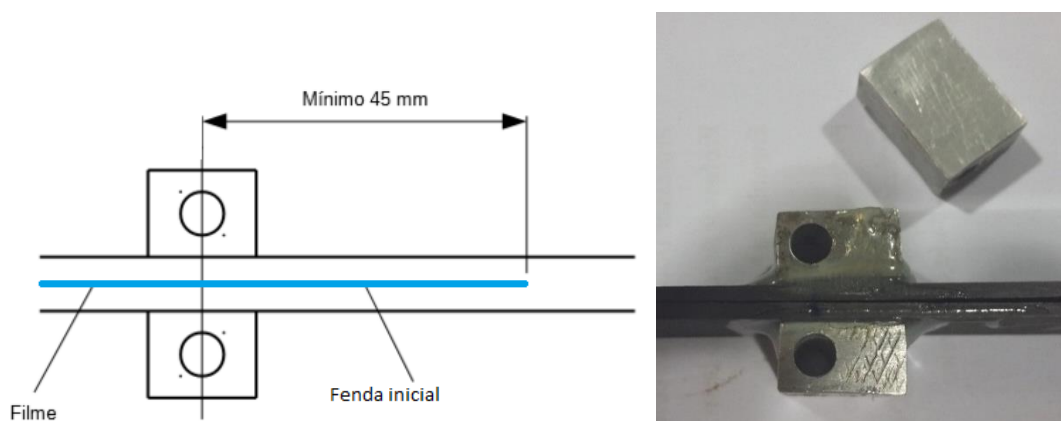
Os provetes ensaiados neste trabalho foram obtidos de placas constituídas por camadas de pré-impregnado de fibra de carbono e matriz de epóxico com referência comercial SEAL HS 160. As placas laminadas unidirecionais foram obtidas por prensagem a quente no INEGI. No processo de fabrico da placa foi inserida a meia-espessura uma película desmoldante de PTFE com 0.015mm de espessura, de modo a criar uma delaminação inicial. O corte foi realizado por disco diamantado, tendo resultado em provetes com as seguintes dimensões nominais (Figura 4.1): comprimento  $c = 250\text{mm}$ , largura  $b = 20\text{mm}$ , espessura  $2h = 3\text{mm}$  e comprimento de fenda inicial  $a = 70\text{mm}$ .



**Figura 4.1-** Esquema das dimensões Iniciais do provete

Antes dos ensaios mediu-se a largura e a espessura dos provetes nas extremidades e numa secção intermédia usando um paquímetro digital da marca Mitutoyo, com resolução de 0.01mm. No tratamento de dados consideraram-se os valores médios.

Para suporte e aplicação da carga, colaram-se blocos de alumínio (Figura 4.2) com dimensões 2 x 20 x 20mm<sup>3</sup> e furo passante de 4.5mm de diâmetro. Inicialmente usou-se super cola 3 (cianoacrilato), mas a colagem revelou-se pouco duradoura. Optou-se depois pela Araldite standard. A posição dos blocos garantiu um comprimento de fenda inicial mínimo de 45 mm.



**Figura 4.2-**Blocos colados num provete: esquema e fotografia.

## 4.2. Ensaios quase-estáticos

Na figura 4.3 está representado um ensaio quase-estático realizado na Shimadzu com uma velocidade constante de 2mm/min. Neste ensaio foram utilizados 3 provetes designados por JV1, JV2 e JV3. Todavia, na sequência de resultados anormais, veio a verificar-se que o provete JV1 tinha defeitos e por isso os resultados dele obtidos não são aqui apresentados. O primeiro ensaio

teve como objetivo iniciar a fenda no provete e obter  $G_{Ic}$  e o módulo de flexão  $E_1$ . O segundo ensaio teve como objetivo verificar o fenómeno da ponte de fibra e obter novos valores nos ensaios de fadiga.



**Figura 4.3**-procedimento ensaio estático na Shimadzu

No tratamento dos resultados dos ensaios quase-estáticos usou-se a Teoria das Vigas Corrigida [Morais e Pereira, 2007]. Para obter o módulo de flexão, definiu-se nas curvas carga-deslocamento ( $P-\delta$ ) a zona linear inicial, com flexibilidade  $C_0$ , que garantiu um coeficiente de correlação superior a 0.999. O módulo pode ser calculado de

$$E_1 = \frac{8(a+\Delta_l)^3}{bh^3C_0} \quad (4.1)$$

sendo neste caso  $\Delta_l$  uma correção para o comprimento de fenda dada pela seguinte equação [Morais, 2013]:

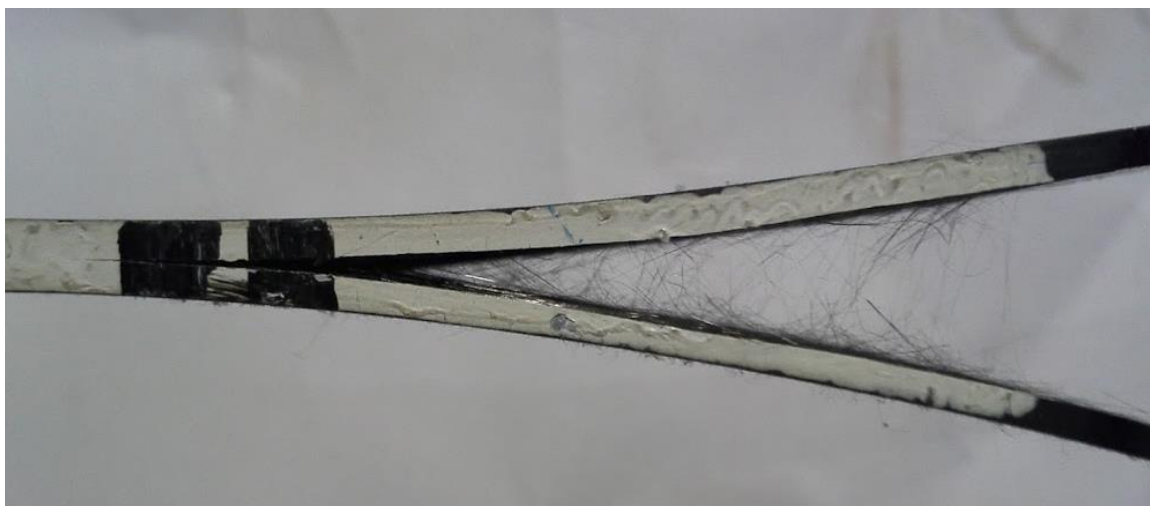
$$\Delta_l = h \sqrt{\frac{E_1}{10G_{13}} + \sqrt{\frac{E_1}{33E_3}}} \quad (4.2)$$

com o módulo transversal  $E_3 = 8.2$  GPa e o módulo de corte  $G_{13} = 4.1$  GPa. A taxa de libertação de energia de deformação é dada por

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a+\Delta_I)} \frac{F}{N} \quad (4.3)$$

onde  $F$  é um fator de correção para grandes deslocamentos e  $N$  é outro fator de correção relativo ao aumento de rigidez provocado pelos blocos metálicos colados ao provete para aplicação da carga. Estes fatores devem ser aplicados sempre que  $\delta/a > 0.4$ , condição que nunca se verificou, e portanto pôde-se desprezar os referidos fatores.

Como se tinha verificado em estudos anteriores com este material [Morais e Pereira, 2007], houve um efeito pronunciado de curva-R, isto é,  $G_{Ic}$  aumentou com o comprimento de fenda devido ao fenómeno de ponte de fibras (Figura 4.4).



**Figura 4.4** – Ponte de fibras num provete ensaiado.

De modo a avaliar este efeito, recorreu-se ao método da fenda equivalente, cujo comprimento é calculado a partir da flexibilidade  $C$  medida no ensaio [Morais e Pereira, 2007]

$$a_e = \frac{h}{2} \sqrt[3]{E_1 b C} \quad (4.4)$$

permitindo depois obter

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2ba_e} \quad (4.5)$$

#### 4.4. Ensaios de fadiga

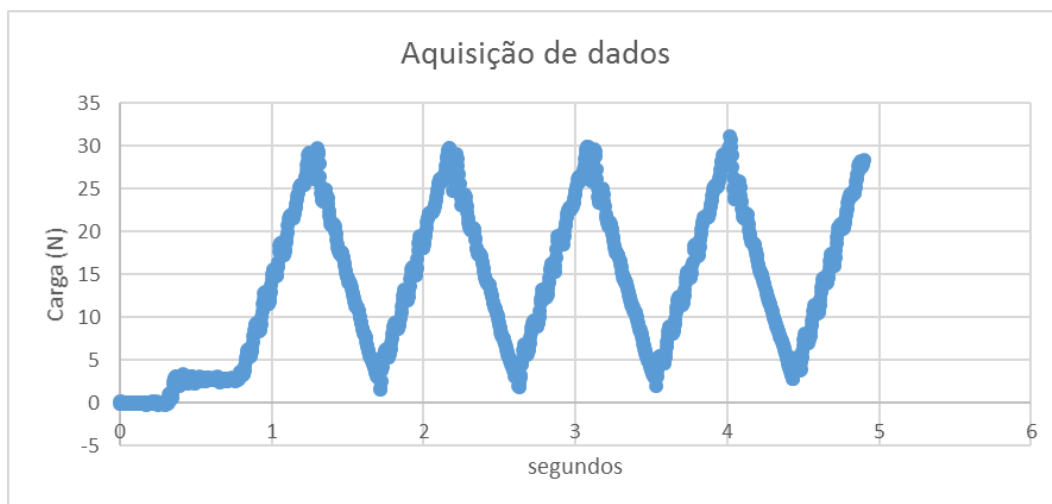
De modo a evitar as complicações associadas ao efeito da curva  $R$  do fenómeno de ponte de fibras nos ensaios de fadiga, realizaram-se ensaios quase-estáticos até se atingir o valor máximo de  $G_{Ic}$ . Só depois os provetes foram submetidos aos ensaios de fadiga. Para não haver deslocamentos demasiado elevados para o dispositivo, após o ensaio estático inicial os blocos de carregamento foram colados em novas posições que garantissem um comprimento de fenda de cerca de 45 mm.

Os ensaios de fadiga foram realizados sob controlo de deslocamentos, ou seja, impondo valores pré-definidos para os deslocamentos máximo e mínimo, prática comum nos ensaios de delaminação sob fadiga (ver capítulo 2.3). O mesmo se aplica ao rácio de tensões  $R = 0.1$  adotado, ou seja, o deslocamento mínimo foi igual a 10 % do deslocamento máximo. Neste trabalho usaram-se deslocamentos máximos de 5.5 e 7.5 mm, de modo a que os ensaios fossem relativamente rápidos.

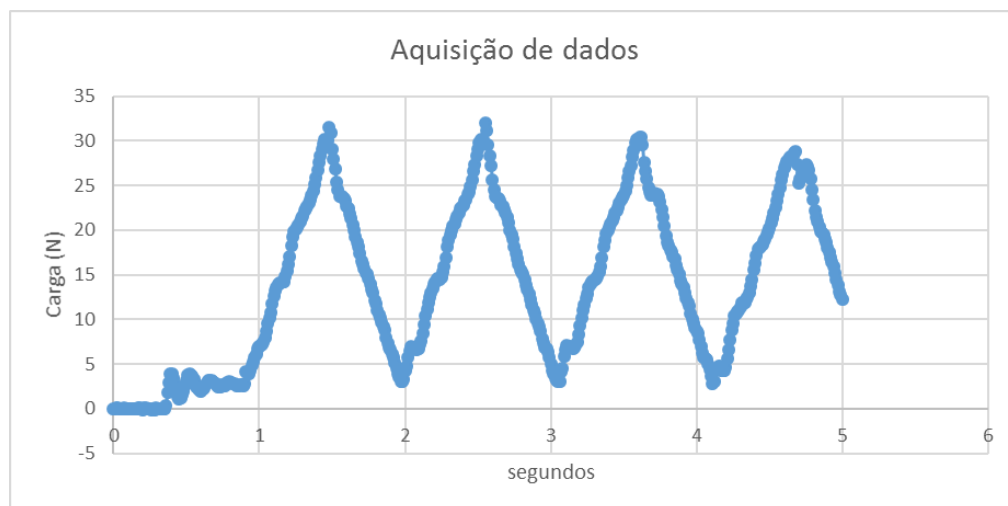
A frequência escolhida foi 1Hz, enquanto que a taxa de aquisição de dados variou entre 100 e 208Hz consoante o deslocamento máximo imposto, para garantir que os picos de carga eram efetivamente medidos. As figuras 4.5



e 4.6 representam a diferença entre uma taxa de aquisição de dados insuficiente e uma taxa de aquisição de dados satisfatória



**Figura 4.5-Aquisição de dados satisfatório**



**Figura 4.6-Aquisição de dados insuficiente**

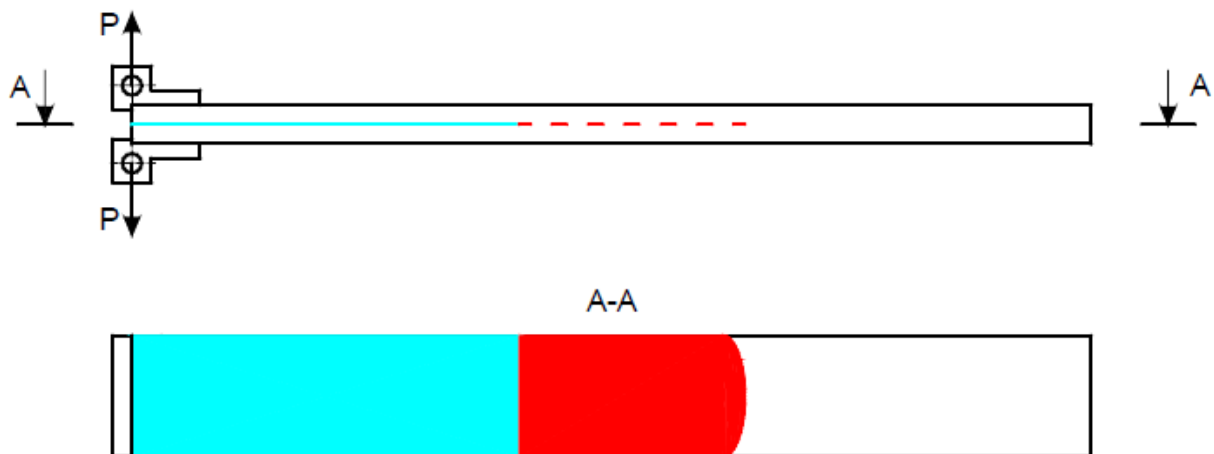


#### 4.4. Medição do comprimento de fenda

A medição do comprimento da fenda ao longo dos ensaios de fadiga é particularmente importante para materiais que apresentam o fenómeno de ponte de fibras. Sendo necessário interromper os ensaios para realizar as medições, considerou-se a possibilidade de recorrer ao equipamento de ultrassons da marca OMNISCANSX-PA1664PR (Figura 4.7). Este aparelho é um detetor de fendas em soldaduras que usa a técnica phased array (PA). A vantagem desta técnica relativamente às observações nos bordos seria poder visualizar toda a frente da fenda, que se sabe ser curva (Figura 4.8).

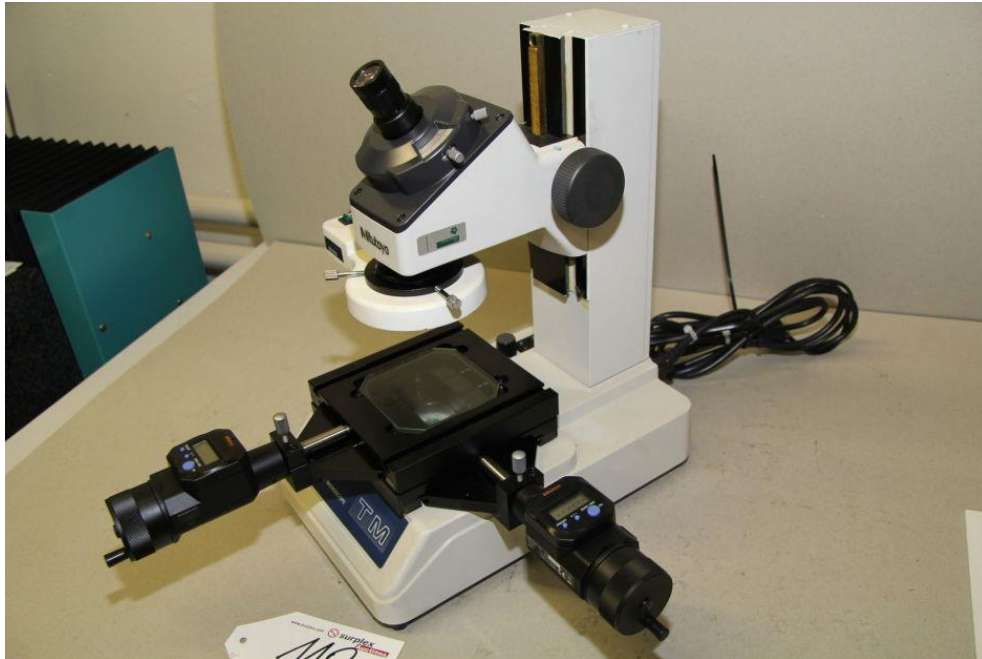


**Figura 4.7-** Aparelho de ultrassom da marca OMNISCANSX-PA1664PR.



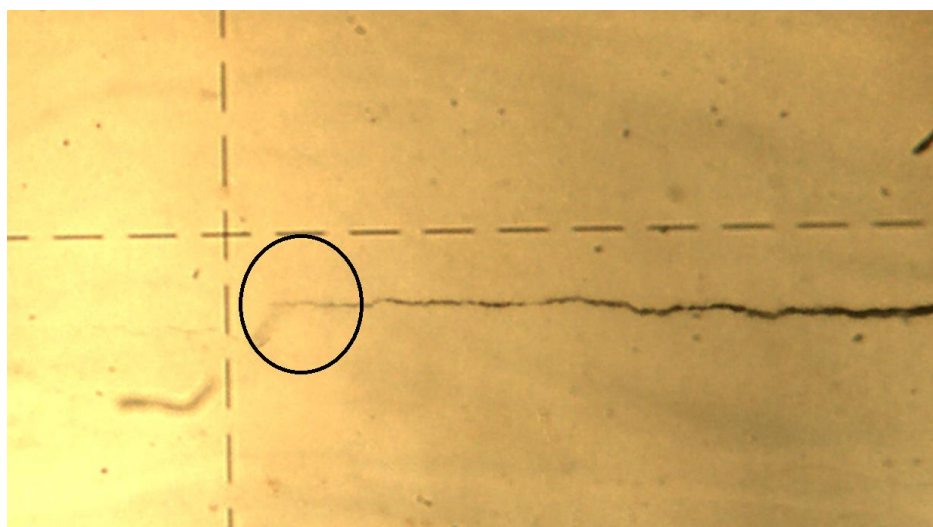
**Figura 4.8-** Curvatura da frente de delaminação: a fenda com uma frente inicialmente reta (azul) propaga-se com uma forma curva [Pereira, 2006]

Todavia, o equipamento de ultrassons não se revelou capaz de detetar com rigor a posição da frente da fenda dos provetes compósitos. Recorreu-se por isso ao microscópio ótico Mitutoyo TM-500 (Figura 4.9), adotando uma ampliação de 30x, a que corresponde a resolução de 1 $\mu$ m. Para facilitar as observações, os bordos dos provetes foram pintados com uma camada fina de corretor branco.



**Figura 4.9** - Microscópio Ótico Mitutoyo TM-500.

A fim de realizar a medição da fenda foi necessário interromper o ensaio, retirar o provete da MEF e identificar a posição extremidade da fenda (Figura 4.10). As observações foram efetuadas nos dois lados do provete.



**Figura 4.10**- Imagem retirada do microscópio onde é possível identificar a extremidade da fenda

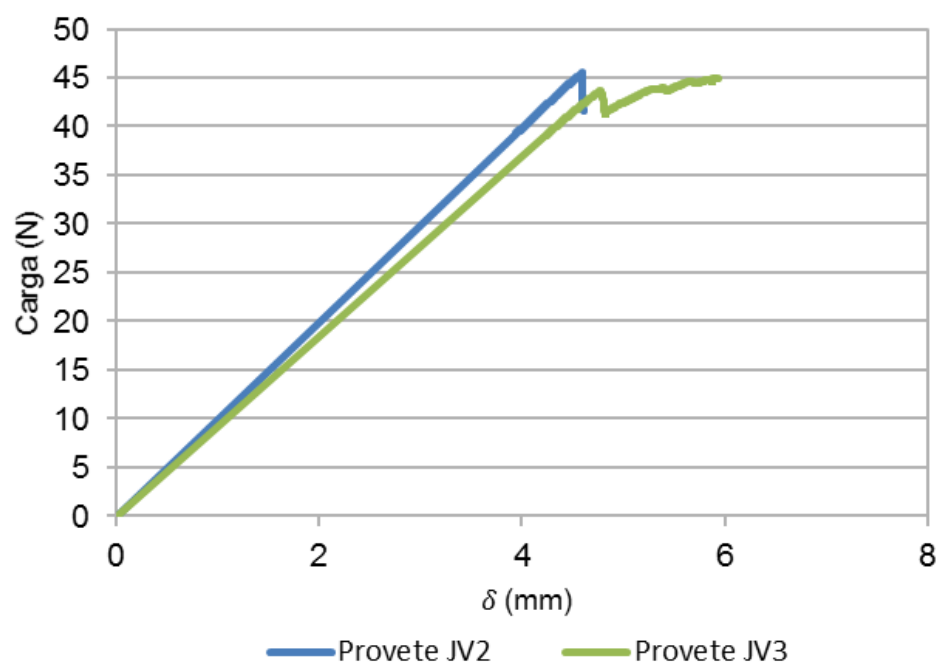


## Capítulo 5

### Resultados e discussão

#### 5.1-Ensaaios quase estáticos

A figura 5.1 mostra as curvas carga-deslocamento obtidas no primeiro ensaio dos provetes, que se destinou a obter o módulo de flexão e valores de  $G_{Ic}$  de iniciação, associados ao ponto de carga máxima. Os valores destas grandezas (Tabela 5.1) estiveram em boa concordância com os medidos por Morais e Pereira (2007).

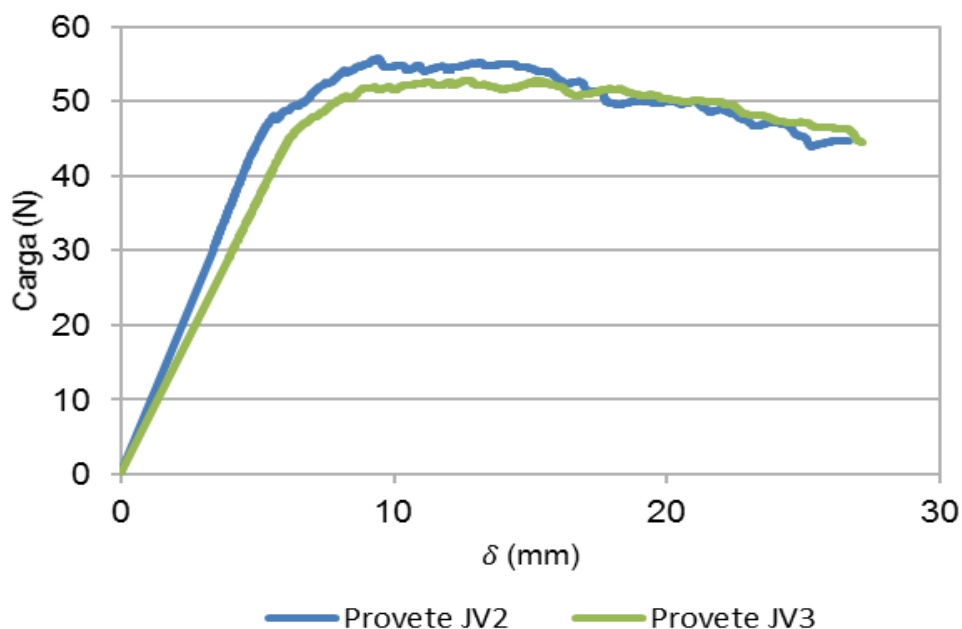


**Figura 5.1**-curvas carga-deslocamento medidas nos primeiros ensaios quase-estáticos.

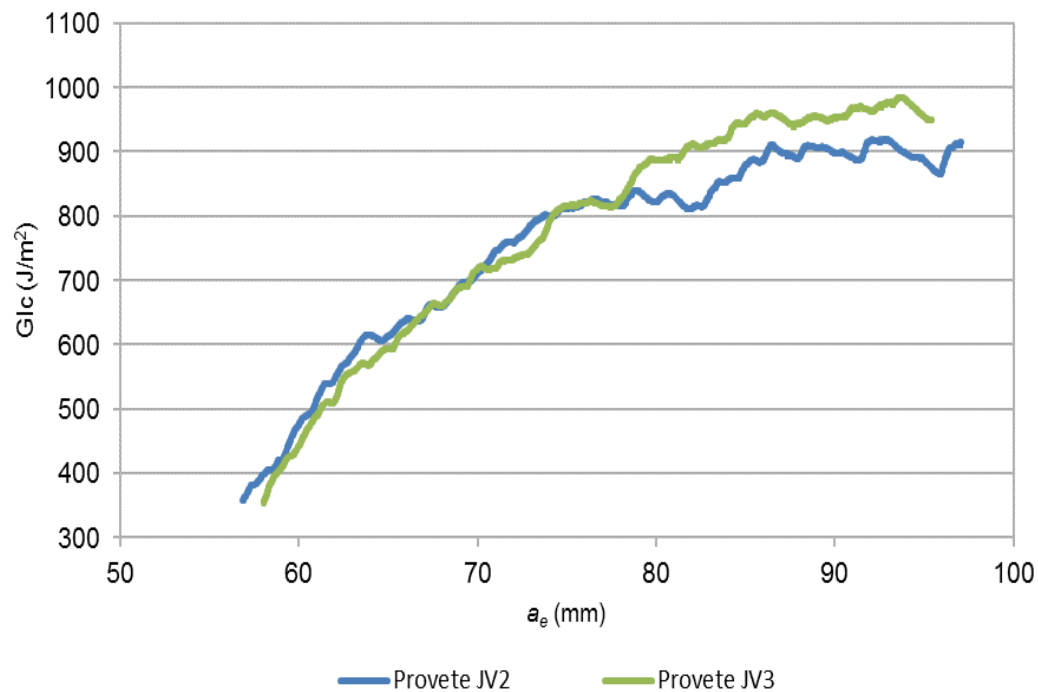
**Tabela 5.1-** Valores do módulo de flexão e de  $G_{Ic}$  de iniciação dos dois provetes ensaiados com resultados válidos.

Provete	$E_1$ (GPa)	$G_{Ic}$ (J/m <sup>2</sup> )
JV2	126	291
JV3	123	289

Os valores de  $G_{Ic}$  apresentados na tabela são obtidos quando se atinge a carga máxima do ensaio quase-estático porque é o ponto de iniciação de fenda mais fiável. De notar que  $G_{Ic}$  aumenta durante o ensaio. Os gráficos das figuras 5.2 e 5.3 mostram esse aumento no segundo ensaio. Os resultados obtidos são novamente semelhantes aos de Morais e Pereira (2007).



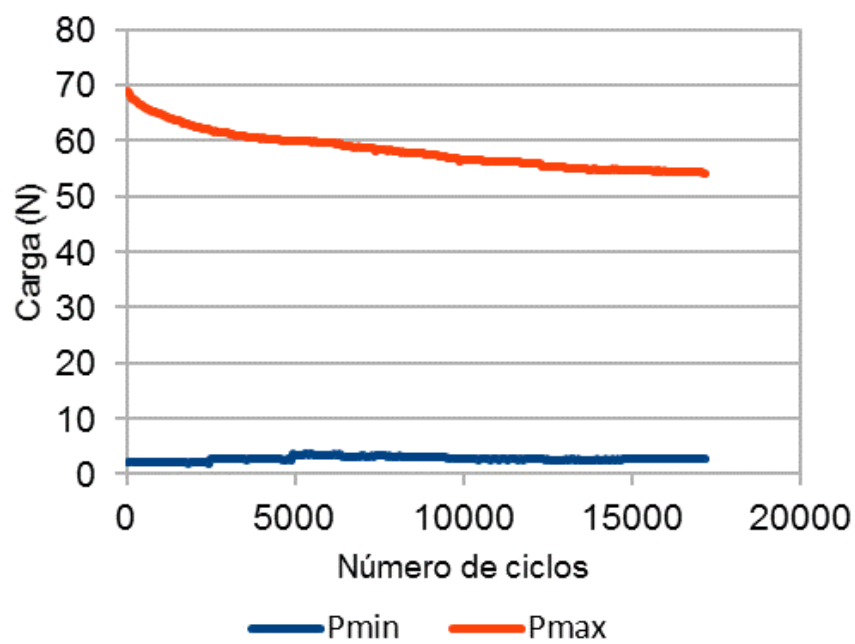
**Figura 5.2-** Curvas carga-deslocamento medidas nos segundos ensaios quase-estáticos.



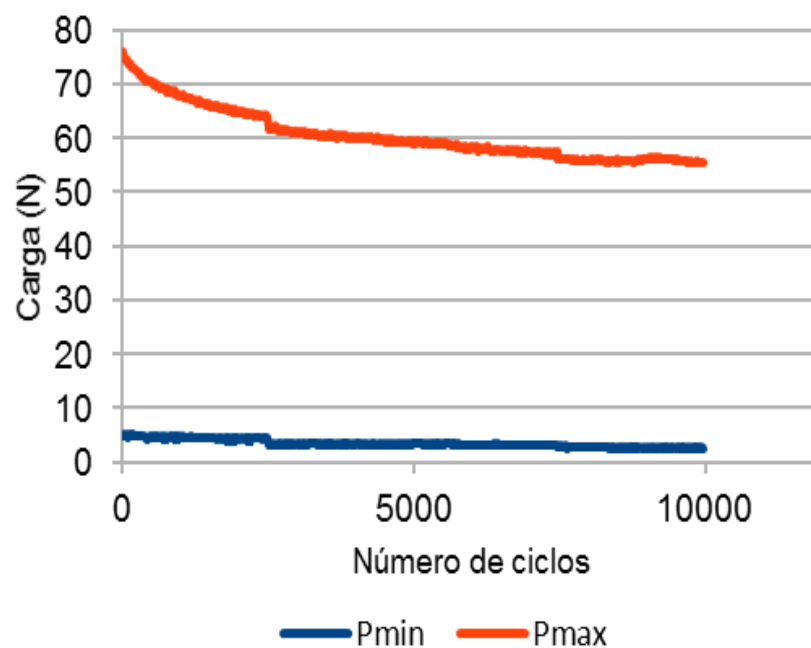
**Figura 5.3-** Curvas  $R$  obtidas nos segundos ensaios quase-estáticos

## 5.2 Ensaio de fadiga

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram a evolução típica das cargas máxima e mínima durante os ensaios.



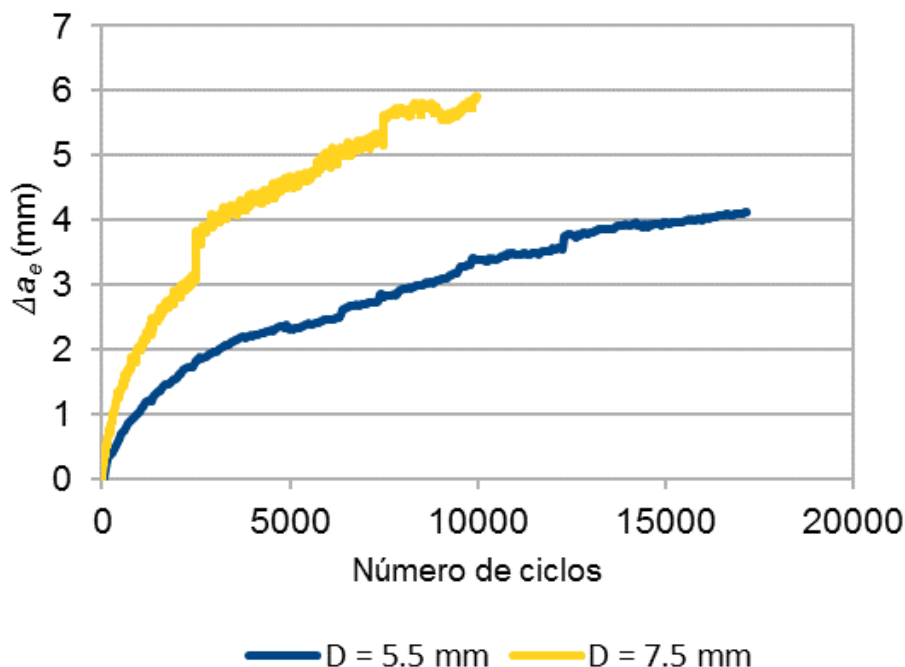
**Figura 5.4** -cargas mínima e máxima medidas durante o ensaio do provete JV2 com o deslocamento máximo de 5.5mm.



**Figura 5.5** -cargas mínima e máxima medidas durante o ensaio do provete JV2 com o deslocamento máximo de 7.5mm.

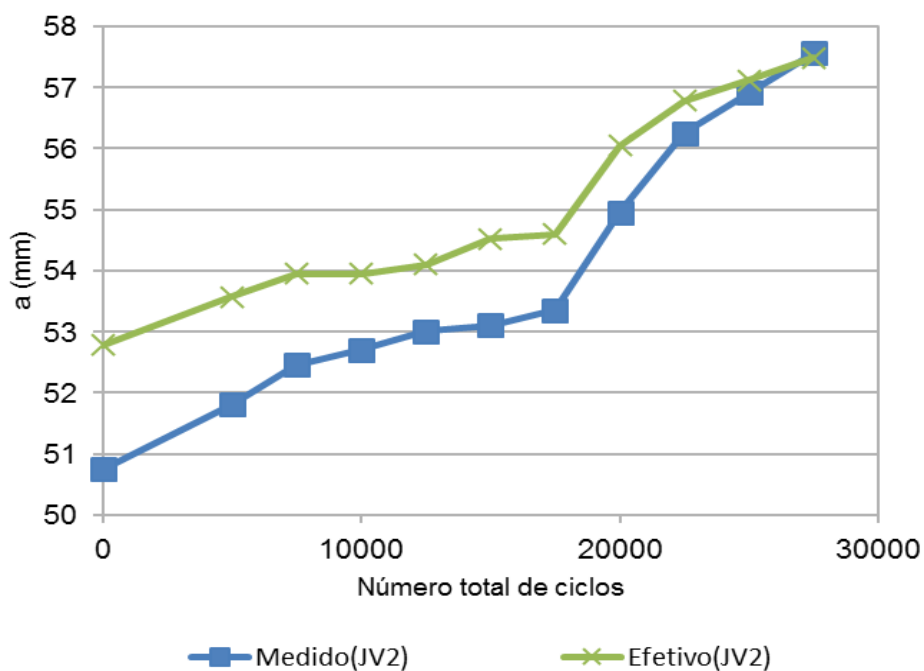


Notou-se que a carga máxima baixava bastante mais rapidamente do que a carga mínima, que é mais afetada pelo ruído eletrónico.

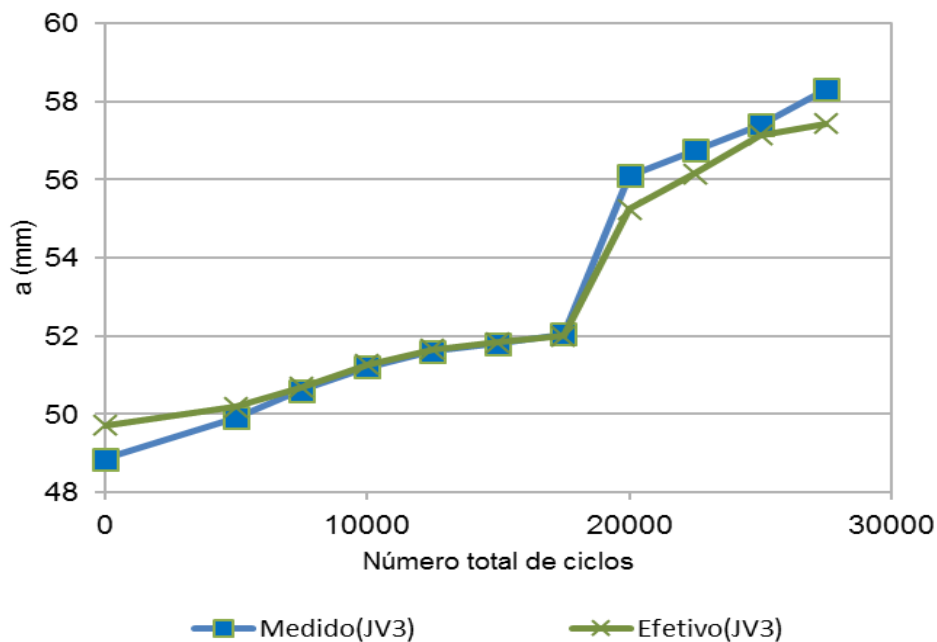


**Figura 5.6** Variação do comprimento de fenda efetivo ( $a_e$ ) com o numero de ciclos impostos ao provete JV2.

Observou-se também uma concordância razoável entre os comprimentos de fenda medidos e efetivo, pelo que se usou  $da_e/dN$  em vez de  $da/dN$ . O  $da_e/dN$  foi obtido identificando zonas quase lineares correspondentes a aumentos de  $a_e$  de cerca 0.5 mm nos gráficos do tipo da figura 5.6.

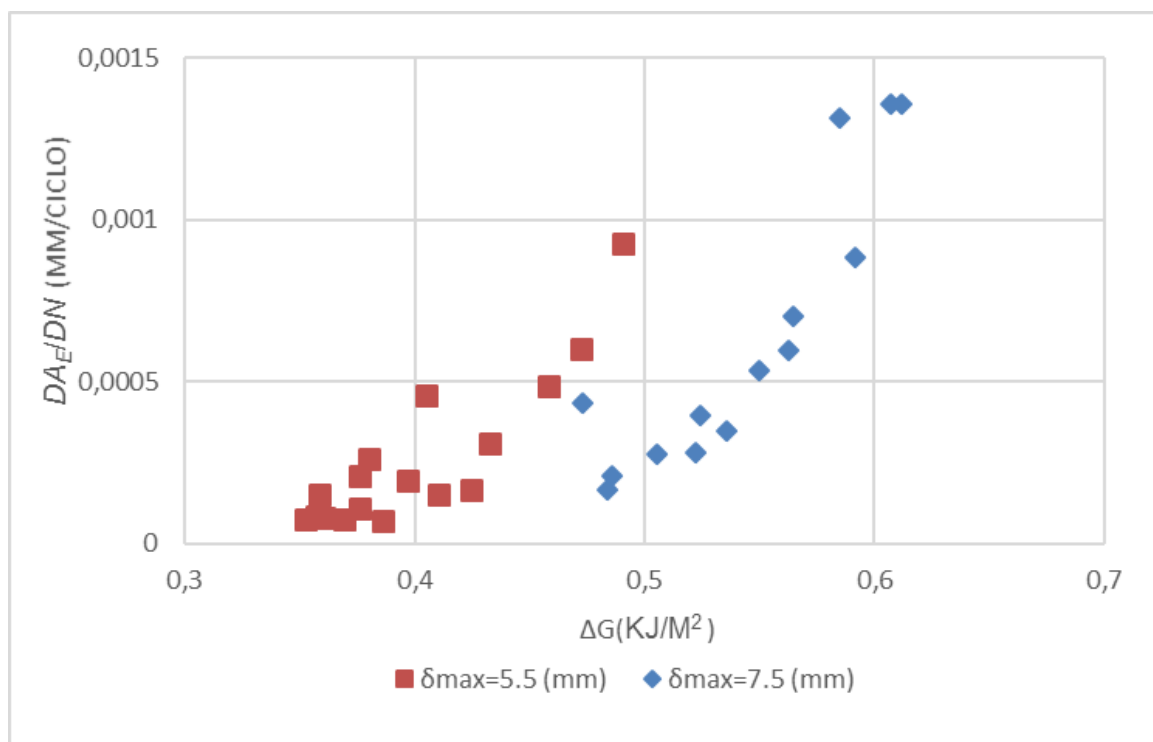


**Figura 5.7** – Comparação do comprimento de fenda efetivo e medido no provete JV2.



**Figura 5.8** – Comparação do comprimento de fenda efetivo e medido no provete JV3.

Na figura 5.9 é possível verificar que a relação  $da_e/dN - \Delta G$  depende do deslocamento imposto. Isto deve-se provavelmente à ponte de fibras, que está mais presente em deslocamentos superiores. Por seu turno, os valores dos parâmetros  $D$  e  $n$  da lei de Paris estão próximos dos valores obtidos por Muri (2011) para um compósito de fibra de vidro com grande extensão de ponte de fibras.



**Figura 5.9-** Variação da taxa de propagação de fenda vs variação da taxa de libertação de energia de deformação



**Tabela 5.2** - Parâmetros da Lei de Paris obtidos.

$\delta_{\max}(\text{mm})$	Coef. Correlação	$D(\text{mm/ciclo})/(\text{kJ/m}^2)^n$	$n$
5.5	0.85	0.0891	6.70
7.5	0.92	0.0621	7.80



## Capítulo 6

### Conclusão trabalhos futuros

As principais conclusões deste trabalho são as seguintes:

- A máquina de baixo custo desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro foi adaptada com sucesso à realização de ensaios de delaminação sob fadiga em modo I.
- Apesar do tratamento de sinal para filtragem do ruído eletrónico ter sido eficaz, verificou-se que o ruído pode afetar as cargas mínimas.
- Os valores de  $G_{Ic}$  medidos foram muito semelhantes aos obtidos em estudos anteriores com o mesmo material carbono/epóxico.
- Sendo ainda escassos para tirar conclusões seguras, os resultados obtidos indicam que o material tem um comportamento à fadiga complexo, que é muito influenciado pelo fenómeno da ponte de fibras.

Demonstrou-se nesta dissertação que a MEF proporciona resultados bastante rigorosos, sobretudo atendendo à relação ao custo/qualidade. Não obstante, ao longo deste trabalho verificou-se existirem alguns aspetos importantes que podem ser melhorados em trabalhos futuros:

- Substituir o sensor ótico por uma régua ótica para melhor rigor no deslocamento imposto e para poder trabalhar a frequências mais altas.
- Desenvolver um sistema que permita medir o comprimento da fenda sem que seja necessário remover o provete do dispositivo.



Além disso, devem prosseguir os estudos do comportamento à fadiga deste material, nomeadamente:

- Avaliar o efeito do rácio de tensões  $R$ .
- Realizar ensaios sob controlo de carga em vez de controlo de deslocamento.
- Conceber e construir dispositivos para ensaios de modo-misto I-II.



## Referências

[Anderson, 1994] T. L. Anderson. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. CRC Press, 1994

[Brunner e outros, 2008] A. J. Brunner, B. R. K. Blackman, P. Davies. A status report on delamination resistance testing of polymer-matrix composites. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, p. 2779-2794, 2008.

[Brunner e outros, 2009] A. J. Brunner, N. Murphy, G. Pinter. Development of a standardized procedure for the characterization of interlaminar delamination propagation in advanced composites under fatigue mode I loading conditions. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, p. 2678-2689, 2009.

[Brunner e outros, 2016] A. J. Brunner, S. Stelzer, G. Pinter, G. P. Terrasi. Cyclic fatigue delamination of carbon fiber-reinforced polymer-matrix composites: Data analysis and design considerations. International Journal of Fatigue, Vol. 83, p. 293-299, 2016.

[Callister e Rethwisch, 2009] W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch. Materials Science and Engineering: An Introduction. 8th Edition. John Wiley and Sons, 2009.

[Dowling, 2006] N. E. Dowling. Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 3rd Edition, Prentice Hall, 2006.

[Griffiths, 2004]. D. J. Griffiths. Introduction to Quantum Mechanics. Prentice Hall, 2004.



[Griffith, 1920] A. A. Griffith. Phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. A221, p. 163–198, 1920.

[Inglis, 1913] C. E. Inglis. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Transactions of the Royal National Institution of Naval Architects of London, Vol. 55, p. 219–230, 1913.

[Martins, 2014] A. P. Martins. Delaminagem à fadiga em modo II de laminados compósitos Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2014.

[Morais e Pereira, 2007] A. B. de Moraes, A. B. Pereira. Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates. Composites Part A, Vol. 38, p. 785-794, 2007.

[Morais, 2013] A. B. de Moraes. Mode I cohesive zone model for delamination in composite beams. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 109, p. 236-245, 2013.

[Moura e outros, 2011] M. Moura, A. Moraes, A. Magalhães, Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, 2ª Edição, 2011.

[Murri, 2011] G. B. Murri. Effect of Data Reduction and Fiber-Bridging on Mode I Delamination Characterization of Unidirectional Composites. Proceedings of the 26th Annual Technical Conference of the American Society for Composites 2011, 2nd Joint US-Canada Conference on Composites. 26-28 September 2011, Montreal, Quebec, Canada, p. 623.

[NI, 2014] National Instruments. Disponível na Internet:  
<http://www.ni.com/labview/pt/>.

[O'Brien, 1982]. T. K. O'Brien. Characterization of Delamination Onset and Growth in a Composite Laminate. in Damage in Composite Materials (ASTM STP 775), K.L. Reifsnider, Eds., PA, Philadelphia, 140, 1982.





[Pardini, 2000] L. C. Pardini. Preformas para Compósitos Estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Vol. 10, p. 100-109, 2000.

[Paris e Erdogan, 1963] P. Paris, F. Erdogan. A critical Analysis of Crack Propagation Laws. Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, p. 528-534, 1963.

[Pascoe e outros, 2011] J.A. Pascoe, R.C. Alderliesten, R. Benedictus. Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds – A critical review. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 112–113, p. 72–96, 2013.

[Paul e outros, 2002]. D. Paul, L. Kelly, V. Venkayya, T. Hes. Evolution of U.S. military aircraft structures technology. J. Aircraft, Vol. 39, p. 18-29, 2002.

[Pereira e Moraes, 2008] A. B. Pereira, A. B. de Moraes. Mixed mode I + II interlaminar fracture of carbon/epoxy laminates. Composites Part A, Vol. 39, p. 322–333, 2008.

[Pereira, 2006] A. M. B. Pereira. Fratura interlaminar de compósitos de matriz polimérica. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

[Rans e outros, 2011] C. Rans, R. C. Alderliesten, R. Benedictus. Misinterpreting the results: how similitude can improve our understanding of fatigue delamination growth. Composites Science and Technology, Vol. 71, p. 230-238, 2011.

[Rezende e outros, 2011] M. C. Rezende, M. L. Costa, E. C. Botelho. Compósitos Estruturais: Tecnologia e Prática. Sao Paulo: Artliber Editora, 2011.

[Sousa, 2013] J. A. A. Sousa. Melhoramento e teste da Máquina de Ensaio de Fadiga. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2014.



[Stelzer e outros, 2012] S. Stelzer, A.J. Brunner, A. Argüelles, N. Murphy, G. Pinter. Mode I delamination fatigue crack growth in unidirectional fiber reinforced composites: Development of a standardized test procedure. Composites Science and Technology, Vol. 72, p 1102–1107, 2012.

[Stelzer e outros, 2014] S. Stelzer, A.J. Brunner, A. Argüelles, N. Murphy, G. M. Cano, G. Pinter. Mode I delamination fatigue crack growth in unidirectional fiber reinforced composites: Results from ESIS TC4 round-robins. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 116, p. 92-107, 2014.

[Strohaecker, 1999] T. R. Strohaecker. Mecânica da Fratura, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 1999.

[TU Delft, 2014], Delft University of Technology: TU delft. Disponível na internet: <http://www.lr.tudelft.nl/index.php?id=26757&langen#delamination..>

[Yao e outros, 2014] L. Yao, R. Alderliesten, M. Zhao, R. Benedictus. Bridging effect on mode I fatigue delamination behavior in composite laminates. Composites Part A, Vol. 63, p. 103–109, 2014.



# Anexos

## Anexo A

### Macro de filtros para encontrar os extremos

#### Sub extremos ()

```
!***** ult é a ultima célula com valor>-10, ou seja, é mesmo a ultima *****
ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-10") + 1 '1 são as células em
branco ou não numéricas
amostra = 50 'quantidade de valores em que é procurada a tendência de
subida/descida
pmax = WorksheetFunction.Max(Range("A:A"))
pmin = WorksheetFunction.Min(Range("A:A"))
p = (pmax + pmin) / 2 'carga intermédia
j = 1 'escreve os resultados na linha j+1
minimoi = 10000
maximo1i = 0
minimo = minimoi
maximo1 = maximo1i
Cells(1, 2) = "pmin (N)"
Cells(1, 3) = "pmax (N)"
Cells(1, 4) = "ciclo nº"
k = 2 ' while serve só para eliminar os dados lixo inicial devido ao labview
arrancar antes da MEF
Do While Cells(k, 1) < p
    k = k + 1
Loop
sobe = 1
asubir = 0
adescer = 0
```



```
For i = k To ult
    If sobe = 1 Then
        If Cells(i, 1) >= maximo1 Then
            maximo1 = Cells(i, 1)
        Else
            adescer = adescer + 1
            If adescer = amostra Then
                sobe = 0
                adescer = 0
                j = j + 1
                Cells(j, 3) = maximo1
                Cells(j, 4) = j - 1
                maximo1 = maximo1i
            End If
        End If
    End If
End If
If sobe = 0 Then
    If Cells(i, 1) < minimo Then
        minimo = Cells(i, 1)
    Else
        asubir = asubir + 1
        If asubir = amostra Then
            sobe = 1
            asubir = 0
            Cells(j, 2) = minimo
            minimo = minimoi
        End If
    End If
End If
Next
End Sub
```



## Anexo B

### Macro utilizada para realizar a media de carga num dado intervalo

#### Sub MédiaFiltro ()

\*\*\*\*\* ult é a ultima célula com valor>-10, ou seja, é mesmo a ultima \*\*\*\*\*

ult = WorksheetFunction.CountIf(Range("A:A"), ">-1") + 1 '1 são as células em  
branco ou não numéricas

n = 5 'tamanho filtro

n1 = 10 'médias

k = 2

L = 2

valor = 0.5 'erro admissível

Cells(1, 2) = "média"

Cells(1, 3) = "média deslizante"

Cells(1, 5) = "média regressão"

Cells(1, 7) = "m.reg.méd"

For i = 2 To ult 'calcula as médias de n em n anterior e seguintes e escreve na  
coluna 2

mediaseg = 0

mediaant = 0

For j = 0 To n - 1

mediaseg = mediaseg + Cells(i + j + n + 1, 1) / n

mediaant = mediaant + Cells(i + j, 1) / n

Next

Cells(k, 2) = (mediaseg + mediaant) / 2

Cells(k, 9) = i - 1

'Cells(k, 7) = mediaseg

'Cells(k, 6) = mediaant

k = k + 1

Next



For i = 2 To ult 'compara os dados da coluna 1 (originais) com as médias da coluna 2 e filtra pelo método das Médias Deslizantes. Escreve os valores válidos na coluna 3.

If Abs(Cells(i, 2) - Cells(i + 5, 1)) < valor Then

Cells(L, 3) = Cells(i + 5, 1) 'valor válido

Cells(L, 4) = i + 5 'posição temporal do valor válido

L = L + 1

End If

Next

'cálculo médias

k = 2

media = 0

b = 0

valori = 2

For i = 2 To L 'cálculo dos pontos médios no intervalo n1

If Cells(i, 4) <= n1 \* k Then 'o if é verdadeiro durante cada n1 valores, portanto a média é para um espaço temporal de 50 (n1) pontos originais mas que agora (em cells(1,3)) serão menos.

media = media + Cells(i, 3) 'da primeira vez é calculada a média para os valores existentes na coluna 3 entre i=1 e i=50

b = b + 1

Else

v = Application.LinEst(Range(Cells(valori, 3), Cells(i - 1, 3)), , True, True)

'efetua regressão linear em cada intervalo n1 da coluna 3. Para uma reta

$y=mx+b$  é  $v(1,1)=m$ ;  $v(1,2)=b$

valori = i 'vai assumir os valores 51,101,...

Cells(k, 7) =  $v(1, 1) * n1 / 2 + v(1, 2)$  'ponto médio obtido da regressão

'Cells(k, 8) =  $-(Cells(k, 7) - 994.75) / 1.9796$  'valores da calibração da célula de carga

Cells(k, 5) = media / b 'valor médio dos pontos existentes no intervalo temporal n1. Naturalmente, este valor tem de ser muito semelhante ao ponto médio da regressão (cells(k,7))



'Cells(k, 6) = -(Cells(k, 5) - 994.75) / 1.9796 'conversão do valor médio anterior  
em carga

Cells(k, 10) = (k - 1) \* n1

media = Cells(i, 3) 'quando este else terminar, o ciclo for vai continuar para i=52  
pelo que se terá de assumir aqui o primeiro valor da média seguinte que será  
calculada entre 51 e 100 e assim sucessivamente

k = k + 1

b = 1

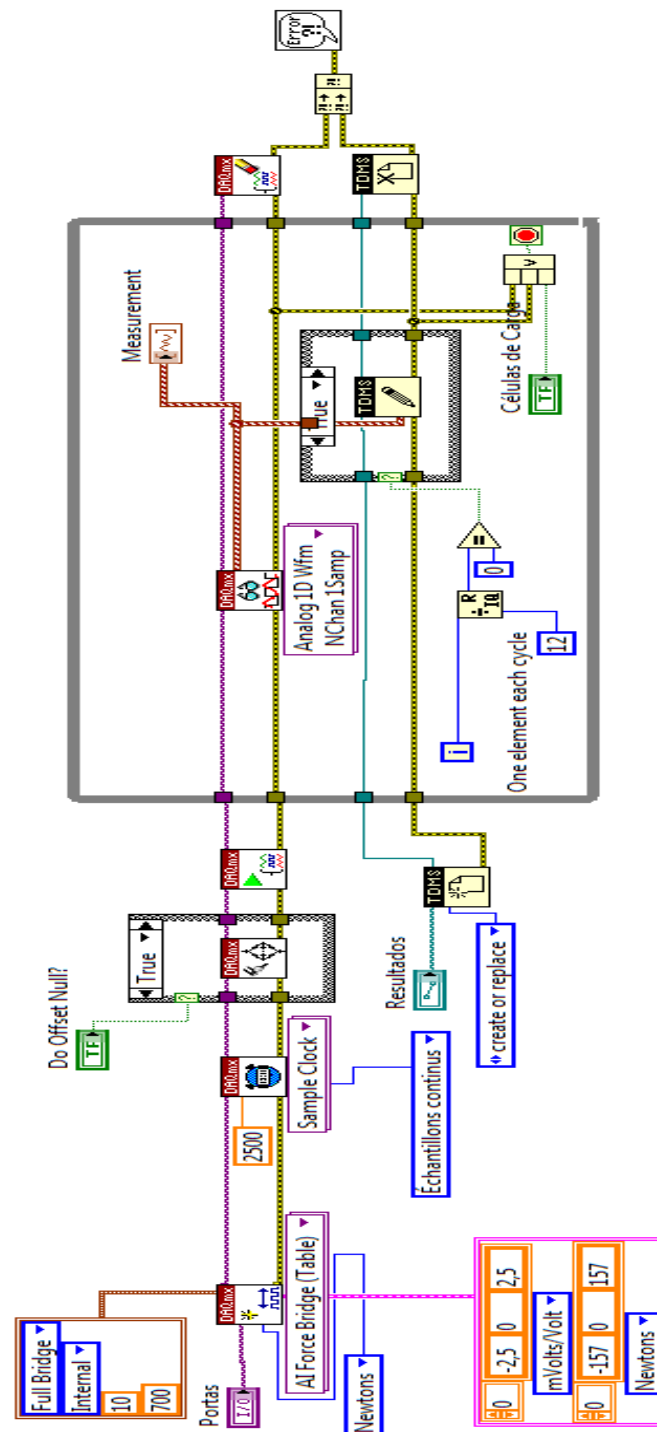
End If

Next

End Sub

## Anexo C

### Diagrama de blocos usada no LabVIEW







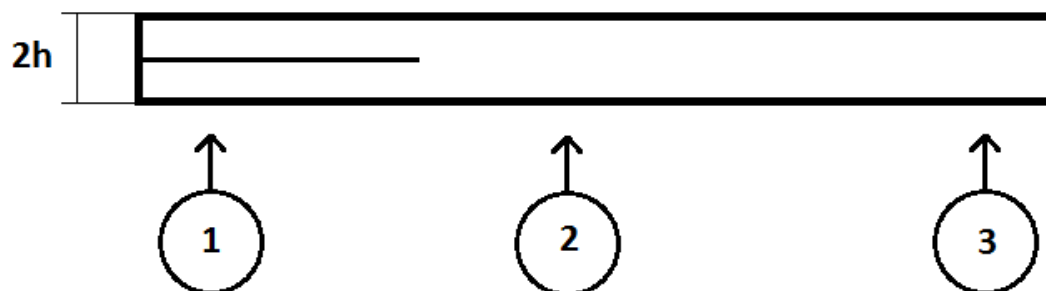
## Anexo D

Calibração da célula. Valores de carga e deslocamento da Shimadzu aplicados na célula da MEF

Shimadzu (N)	celula (N)	deslocamento (mm)
0	0,030712373	0
2	7,043181158	0,01
4	13,90282589	0,02
8	27,72804316	0,03
16	55,72234739	0,06
32	111,2171583	0,11
45	156,2194415	0,14
64	220,8514155	0,19

## Anexo D

Esquema do provete e medição dos valores  $2h$  e  $b$  em três pontos



Provete	Pontos		
	1	2	3
JV1	$2h = 3,34\text{mm}$ $b = 20,19\text{mm}$	$2h = 3,32\text{mm}$ $b = 20,32\text{mm}$	$2h = 3,30\text{mm}$ $b = 19,96\text{mm}$
JV2	$2h = 3,91\text{mm}$ $b = 20,15\text{mm}$	$2h = 3,98\text{mm}$ $b = 20,18\text{mm}$	$2h = 3,39\text{mm}$ $b = 20,04\text{mm}$
JV3	$2h = 3,45\text{mm}$ $b = 20,21\text{mm}$	$2h = 3,33\text{mm}$ $b = 20,02\text{mm}$	$2h = 3,32\text{mm}$ $b = 19,85\text{mm}$



## Anexo E

### Registo dos comprimentos de fendas durante os ensaios

	MEDIDAS ABSOLUTAS (mm)				
	CICLOS	ESQUERDA	DIREITA	MÈDIA	AUMENTO
INICIAL	0	49,95	50,31	50,13	0
<b>DESLOCAMENTO 3,65</b>					
ensaio 1	3600	51,9	50,31	51,105	0,975
ensaio 2 e 3	10800	53,93	50,31	52,12	1,015
ensaio 4	14400	53,93	50,31	52,12	0
<b>DESLOCAMENTO 4,2</b>					
ensaio 5	5000	54,85	51,91	53,38	1,26
ensaio 6	10000	56,45	52,91	54,68	1,3
ensaio 7	19000	57,55	53,51	55,53	0,85
ensaio 8	26200	57,65	54,61	56,13	0,6
ensaio 9	33400	58,75	54,91	56,83	0,7
ensaio 10	42400	58,95	54,91	56,93	0,1
ensaio 11	57400	58,95	54,91	56,93	0
<b>DESLOCAMENTO 5</b>					
ensaio 12	5000	59,75	56,01	57,88	0,95
ensaio 13	10000	60,55	56,41	58,48	0,6
ensaio 14	19000	60,95	56,91	58,93	0,45
ensaio 15	28000	60,95	56,91	58,93	0
<b>DESLOCAMENTO 6</b>					
ensaio 16	2500	62,05	58,71	60,38	1,45
ensaio 17	5000	62,35	59,11	60,73	0,35
ensaio 18	9500	62,85	59,51	61,18	0,45
ensaio 19	14000	63,55	59,91	61,73	0,55
ensaio 20	18500	63,95	60,41	62,18	0,45
ensaio 21	23000	64,35	60,61	62,48	0,3
ensaio 22	27500	64,55	60,91	62,73	0,25
ensaio 23	32000	64,95	61,11	63,03	0,3
ensaio 24	36500	65,05	61,21	63,13	0,1
ensaio 25	41000	65,25	61,31	63,28	0,15
ensaio 26	45500	65,45	61,61	63,53	0,25
ensaio 27	50000	65,65	61,91	63,78	0,25
ensaio 28	54500	65,85	62,11	63,98	0,2
ensaio 29	59000	65,85	62,91	64,38	0,4



ensaio 30	63500	65,85	63,01	64,43	0,05
ensaio 31	68000	65,85	63,01	64,43	0
<b>DESLOCAMENTO 7</b>					
ensaio 32	4500	66,25	63,31	64,78	0,35
ensaio 33	9000	66,55	63,61	65,08	0,3
ensaio 34	13500	67,05	64,01	65,53	0,45
ensaio 35	18000	67,25	64,21	65,73	0,2
ensaio 36	22500	67,65	64,41	66,03	0,3
ensaio 37	27000	67,95	64,66	66,305	0,275
ensaio 38	31500	68,25	65,01	66,63	0,325
ensaio 41	36000	68,35	65,21	66,78	0,15
ensaio 40	40500	68,45	65,46	66,955	0,175
ensaio 41	45000	68,75	65,71	67,23	0,275
ensaio 42	49500	68,85	65,81	67,33	0,1
ensaio 43	54000	69,05	66,11	67,58	0,25
ensaio 44	58500	69,15	66,51	67,83	0,25
ensaio 45	63000	69,25	66,61	67,93	0,1
ensaio 46	67500	69,25	66,61	67,93	0

**Figura E.1**-provete JV1 pelo método inicial

	MEDIDAS ABSOLUTAS (mm)				
	CICLOS	ESQUERDA	DIREITA	MÉDIA	AUMENTO
INICIAL	0	46,01	51	48,505	0
<b>DESLOCAMENTO 5,5</b>					
ensaio 1	2500	48,71	52,8	50,755	2,25
ensaio 2	5000	50,31	53,3	51,805	1,05
ensaio 3	7500	51,11	53,8	52,455	0,65
ensaio 4	10000	51,41	54	52,705	0,25
ensaio 5	12500	51,81	54,2	53,005	0,3
ensaio 6	15000	52,01	54,2	53,105	0,1
ensaio 7	17500	52,21	54,5	53,355	0,25
ensaio 8	20000	52,21	54,5	53,355	0
<b>DESLOCAMENTO 7,5</b>					
ensaio 9	2500	53,51	56,4	57,775	4,42
ensaio 10	5000	55,01	57,5	58,23333	0,458333333
ensaio 11	7500	55,41	58,4	58,6	0,366666667
ensaio 12	1000	56,31	58,8	58,8	0,2

**Figura E.2**-provete JV2 pelo segundo método



	MEDIDAS ABSOLUTAS (mm)				
	CICLOS	ESQUERDA	DIREITA	MÈDIA	AUMENTO
INICIAL	0	47,5	43,1	45,3	0
DESLOCAMENTO 5,5					
ensaio 1	2500	51,2	46,5	48,85	3,55
ensaio 2	5000	52,1	47,7	49,9	1,05
ensaio 3	7500	53	48,2	50,6	0,7
ensaio 4	10000	53,8	48,6	51,2	0,6
ensaio 5	12500	54,1	49,1	51,6	0,4
ensaio 6	15000	54,3	49,3	51,8	0,2
ensaio 7	17500	54,8	49,3	52,05	0,25
DESLOCAMENTO 7,5					
ensaio 8	2500	58,8	53,4	56,1	4,05
ensaio 9	5000	59,3	54,2	56,75	0,65
ensaios 10	7500	60,1	54,7	57,4	0,65
ensaio 11	10000	61,1	55,5	58,3	0,9

**Figura E.3-Porvete JV3 pelo segundo método**

## Anexo F

### cargas mínimas e máximas durante o ensaio

